

ANNALES SCIENTIFIQUES DE L'É.N.S.

KRETZ

**Mémoire sur les conditions à remplir dans l'emploi du
frein dynamométrique**

Annales scientifiques de l'É.N.S. 2^e série, tome 2 (1873), p. 55-79

http://www.numdam.org/item?id=ASENS_1873_2_2_55_0

© Gauthier-Villars (Éditions scientifiques et médicales Elsevier), 1873, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales scientifiques de l'É.N.S. » (<http://www.elsevier.com/locate/ansens>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

MÉMOIRE

SUR LES

CONDITIONS A REMPLIR DANS L'EMPLOI DU FREIN DYNAMOMÉTRIQUE⁽¹⁾,

PAR M. KRETZ,

INGÉNIEUR EN CHEF, INSPECTEUR DES MANUFACTURES DE L'ÉTAT.

Le frein dynamométrique employé, en 1821, par Prony, pour évaluer la puissance de la machine à vapeur du Gros-Caillou est encore aujourd'hui l'appareil le plus généralement usité pour mesurer le travail disponible fourni par les machines. L'exactitude des résultats obtenus par son emploi dépend, comme pour tout instrument de mesure, de l'habileté de l'opérateur, des soins apportés à l'expérience et de la disposition propre de l'appareil. Le but que l'on doit chercher à atteindre est de limiter autant que possible l'influence du premier de ces éléments, de recourir à des dispositions qui conduisent à la même mesure quel que soit l'opérateur, et qui, surtout, ne permettent jamais à celui-ci de faire varier les évaluations. En un mot, l'instrument en lui-même ne doit renfermer aucune cause d'erreur, et mieux vaut qu'il ne puisse conduire à aucun résultat quand l'expérience est mal dirigée, que de le disposer de telle sorte qu'il donne avec facilité des résultats incertains ou variables à volonté.

Les divers modèles de frein qui sont ordinairement employés dans l'industrie ne sont pas, à cet égard, à l'abri de tout reproche; le plus

(¹) Présenté à l'Académie des Sciences le 7 mars 1864.

souvent on sacrifie l'exactitude au désir d'éviter des installations coûteuses, ou à l'unique préoccupation de rendre les expériences plus commodées. Il en résulte que, malgré le grand nombre d'essais au frein qui ont été exécutés depuis une trentaine d'années, on n'a que des données assez incertaines sur le rendement des machines motrices, surtout sur la dépense de combustible qu'elles exigent, et que, bien souvent, deux machines complètement semblables, construites avec les mêmes soins, dans un même atelier, donnent lieu à des appréciations très-différentes. Il est donc du plus haut intérêt, pour le constructeur comme pour l'industriel, qu'une rigueur complète soit introduite dans les moyens de mesure, de telle sorte que les résultats obtenus dans toutes les expériences deviennent comparables entre eux.

C'est vers ce but qu'ont été dirigés les efforts des expérimentateurs célèbres qui, peu de temps après l'invention du frein, contribuèrent si puissamment à en répandre et à en généraliser l'emploi. M. Poncelet, le premier, apporta dans la disposition primitive imaginée par M. Prony, décrite dans le tome XIX des *Annales de Chimie et de Physique* (année 1821), plusieurs modifications destinées à en faciliter l'installation et le maniement; d'autres ingénieurs, MM. Piobert, Tardy, Morin, en France, Egen, en Prusse, firent de nombreuses expériences et réalisèrent de nouvelles améliorations qui sont décrites dans les diverses publications de ces auteurs.

En 1837, M. de Saint-Léger, qui venait de faire des essais multipliés dans le département de la Seine-Inférieure, inséra dans les *Annales des Mines* (tome XII) une Notice détaillée signalant les inconvénients que le frein ordinaire présente dans la pratique, et indiquant les précautions de tout genre qu'il convient de prendre pour obtenir une mesure facile et exacte du travail. Ces prescriptions, quoique conduisant sur certains points à des dispositions trop compliquées, étaient basées sur la saine théorie que l'on a peut-être eu le tort de trop négliger dans la suite.

Depuis 1846, de nombreux essais au frein ont été exécutés par les Ingénieurs de l'Administration des Tabacs. M. Rolland qui, à cette époque, était ingénieur, inspecteur des constructions du service, s'efforça, dès l'origine, d'introduire dans ces expériences délicates toute la rigueur dont elles sont susceptibles; plusieurs modifications furent

apportées par lui, plus tard par M. Demondésir et par moi, aux appareils ainsi qu'aux procédés d'expérimentation ordinairement employés. Quoique toutes les difficultés qui se présentent dans les essais des machines très-puissantes ne soient pas encore résolues d'une manière complète, nous croyons avoir fait faire des progrès sérieux à la question.

THÉORIE DU FREIN.

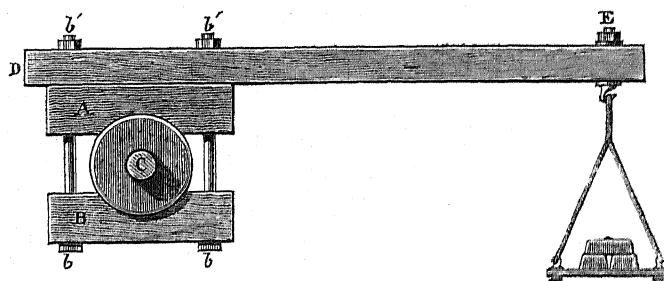
La théorie du frein, telle qu'elle a été exposée par Prony lui-même, suppose que l'appareil soit exactement équilibré autour de l'axe de l'arbre moteur et reste en repos pendant toute la durée de l'essai. La disposition adoptée par l'illustre inventeur était parfois fort gênante et a dû être abandonnée; M. de Saint-Léger, dans sa Notice, a indiqué plusieurs procédés pour équilibrer un frein quelconque, sans insister, du reste, sur la nécessité de ces précautions; dans sa théorie il suppose, ainsi que Prony, que le frein reste en repos, et, tout en décrivant un moyen de ralentir les oscillations qui se produisent inévitablement, il a omis d'en étudier l'influence. Cependant des doutes ont souvent été élevés sur ce point, et l'on s'est demandé si la formule qui est exacte pour l'état d'équilibre l'est également lorsqu'il se produit des oscillations.

Je vais rappeler succinctement la théorie, en supposant que le centre de gravité du frein ne se trouve pas sur l'axe de l'arbre; j'examinerai ensuite l'influence des oscillations, je déduirai de cette étude les conditions que doit remplir l'appareil pour conduire à des résultats exacts; enfin j'indiquerai les moyens pratiques à employer pour réaliser ces conditions.

Conditions d'équilibre du frein. — Le frein dynamométrique se compose essentiellement de deux mâchoires en bois A et B (*fig. 1*) que l'on peut serrer plus ou moins à l'aide de deux boulons *bb'* munis d'écrous, contre la jante d'une poulie montée sur l'arbre C, auquel est transmis le travail qu'il s'agit de mesurer; une barre DE, que l'on appelle *levier* du frein, est solidement reliée à l'une ou à l'autre des deux mâchoires et porte, vers l'extrémité E, un crochet auquel est suspendu

un plateau de balance. De la pression des mâchoires sur la poulie résulte, par suite du mouvement de l'arbre, un frottement qui tend à entraîner le levier; on peut s'opposer à cet entraînement en plaçant un poids convenable dans le plateau.

Fig. 1.



Pour faire un essai, on suspend l'action de toutes les résistances qui agissent sur la machine pendant sa marche ordinaire; on amène la machine à sa vitesse de règle en augmentant ou en diminuant le serrage, et l'on maintient le levier en plaçant un poids convenable dans le plateau; il est clair que, en considérant un intervalle de temps tel que la vitesse initiale de la machine soit exactement la même que la vitesse finale, le travail moteur transmis à l'arbre O pendant ce temps, déduction faite des frottements dans les coussinets, est exactement égal au travail résistant développé par l'action des mâchoires sur la jante de la poulie, travail qu'il est facile d'évaluer. En effet, soient :

P le poids placé dans le plateau augmenté du poids de ce plateau et de son attache ;

l la distance de l'axe de l'arbre à la verticale qui passe par le crochet de suspension, pour la position qu'a le levier pendant l'expérience ;

p le poids du frein ;

q la distance de l'axe de l'arbre à la verticale qui passe par le centre de gravité du frein ;

R le rayon de la poulie du frein ;

ΣF la somme des composantes tangentielles de toutes les actions des mâchoires sur la poulie.

En prenant les moments par rapport à l'axe de toutes les forces qui agissent sur le frein,

$$\Sigma FR = Pl + pq,$$

et si m est le nombre de tours qu'a faits l'arbre pendant le temps considéré, le travail du frottement du frein, pendant ce temps, et par suite le travail disponible transmis, sera donné par l'égalité

$$2\pi m \Sigma FR = 2\pi m (Pl + pq).$$

Si nous représentons par n le nombre de tours que fait l'arbre par seconde, le travail moyen en chevaux aura pour expression

$$T = 2\pi n \frac{(Pl + pq)}{60 \times 75}.$$

Conditions d'application de la formule.

Constance de la vitesse. — Pour établir cette formule, nous supposons, en premier lieu, que la vitesse de la machine à la fin de l'essai soit exactement la même qu'au commencement, et en second lieu que, pendant toute la durée de l'essai, le levier du frein reste immobile. La première condition peut toujours être réalisée par des tâtonnements préalables : on augmente successivement le serrage et la charge du plateau jusqu'au moment où le mouvement de la machine ne s'accélère plus. Si, dans une expérience, on trouve qu'il y a eu ralentissement ou accélération, il faut conclure que le poids placé dans le plateau était trop fort ou trop faible ; il devient alors nécessaire de recommencer l'essai. Si l'on ne veut pas le perdre entièrement, on peut ajouter ou retrancher des poids à un certain moment, de manière à ramener la vitesse à ce qu'elle était à l'origine, en ayant soin de noter le nombre de tours faits par la machine sous chaque charge ; on arrive ainsi à une estimation du travail moyen transmis.

Dans les essais industriels, il importe que la vitesse finale soit égale à la vitesse initiale ; toute variation de la force vive de la machine introduirait en effet une erreur dans l'évaluation du travail moteur qui ne

serait plus égal au travail mesuré par le frein. Une autre considération, bien plus importante dans beaucoup de cas, exige la constance absolue de la vitesse pendant l'essai; si cette vitesse est variable, on ne détermine plus, ainsi qu'on se le propose en général, le coefficient d'effet utile de la machine pour une marche normale déterminée, mais un coefficient moyen pour toutes les marches comprises entre celles qui correspondent aux vitesses extrêmes de la machine pendant l'essai. Ordinairement les coefficients d'effet utile varient assez rapidement avec la vitesse de la machine motrice, et l'on s'exposerait souvent à des erreurs très-graves si l'on considérait le coefficient moyen obtenu dans une marche variable comme le coefficient correspondant réellement à la vitesse moyenne pendant l'essai.

Pour ces motifs, il importe de s'assurer que la vitesse à la fin de l'expérience est exactement la même qu'au commencement et qu'elle ne varie pas sensiblement dans l'intervalle; cette vérification se fait en comptant, avec l'aide d'une bonne montre à secondes, le nombre de tours faits par la machine pendant une minute au moins, au commencement et dans le courant de l'essai; on doit terminer celui-ci en un moment pour lequel l'égalité des vitesses initiale et finale a été constatée directement; le nombre total de tours faits par la machine pendant l'essai est inscrit par un compteur.

Durée de l'essai. — Il résulte de ce qui vient d'être dit qu'il est nécessaire de prolonger l'essai pendant une certaine durée que nous évaluons à une dizaine de minutes au moins; en effet, on commet, dans tout comptage de nombre de tours, une erreur d'une fraction plus ou moins grande de révolution; il serait difficile, si l'essai était trop court, de s'apercevoir d'une variation de la vitesse de la machine, ce qui exposerait aux inconvénients que nous venons de signaler; d'un autre côté, l'erreur commise sur le nombre total de tours a une influence d'autant plus grande dans l'appréciation du travail que ce nombre de tours est plus faible, que l'essai a duré moins longtemps.

Pour définir la valeur industrielle d'une machine à vapeur, il faut compléter l'essai au frein par un essai de combustible, ayant pour but de faire connaître la quantité de charbon brûlée par heure et par force de cheval. Un tel essai présente des incertitudes assez grandes

provenant de la mise à feu et de la période d'arrêt de la machine ; pour arriver à des résultats concluants, il faut donc que ces erreurs possibles soient réparties sur un temps très-long, qui doit être au moins de six à huit heures.

Production des oscillations. — La théorie du frein exposée plus haut suppose que le levier est immobile pendant toute l'expérience. Or il n'est pas possible de maintenir le levier dans une position invariable pendant un temps aussi long ; le frottement du frein sur la poulie, malgré toutes les précautions qu'on peut prendre, ne reste pas constant, en sorte que, sous l'action de ce frottement, de la charge du plateau et du poids du frein, le levier s'élève ou s'abaisse, et pour le ramener à sa position première on est obligé d'augmenter ou de diminuer le serrage à l'aide des écrous.

Pour la sécurité et pour la possibilité même des essais, il est nécessaire de limiter les excursions du frein au-dessous et au-dessus de sa position normale, que nous supposons dans la suite être la position horizontale ; on arrive à ce résultat en établissant deux arrêts solides, tels que de fortes traverses en charpente, contre lesquelles vient butter le levier à la limite des plus grandes oscillations que l'on veut lui permettre. Cette précaution est nécessaire, parce que, au commencement de l'essai, il est ordinairement très-difficile de maintenir le frein ; les impulsions parfois violentes qu'il reçoit feraient tomber les poids, pourraient entraîner tout le système et être la cause d'accidents sérieux pour les expérimentateurs ; enfin, pendant le courant de l'essai même, une simple inattention de l'opérateur, une fausse manœuvre donneraient lieu aux mêmes inconvénients.

Dans toute expérience, le levier occupera donc des positions variables d'un instant à l'autre et sera tantôt au-dessous, tantôt au-dessus de l'horizontale ; ces oscillations seront irrégulières et leur amplitude dépendra de la promptitude que l'on mettra à y remédier par la variation du serrage ; la volonté de l'opérateur joue ici un grand rôle, car celui-ci peut, en serrant plus ou moins, maintenir constamment le levier au-dessus ou au-dessous de sa position normale. Or, quelles que soient les irrégularités qui se présentent, on ne peut pas en tenir compte dans le calcul du résultat, et l'on admet, dans l'estimation de la puis-

sance de la machine, que le travail du frottement est toujours mesuré par l'expression

$$2\pi m(Pl + pq),$$

dans laquelle on substitue à P la charge réelle du frein pendant l'expérience, et à l et pq les valeurs qu'ont ces quantités, lorsque le levier est parfaitement horizontal.

Influence des oscillations. — Nous allons rechercher les précautions qu'il faut prendre pour que le mode d'opérer auquel on est astreint ne donne lieu à aucune erreur.

Il est évident d'abord que si, pendant les oscillations du levier, les moments Pl et pq sont sujets à des variations, les résultats obtenus seront nécessairement incertains et conduiront à des estimations différentes suivant que le levier sera resté plus longtemps dans telle ou telle position. Il faut donc, avant tout, que ces moments soient invariables pendant la durée de l'essai. Nous indiquerons plus loin quelles mesures il faut prendre à cet égard; admettons que la condition soit remplie et recherchons l'influence que, dans cette hypothèse, les oscillations peuvent avoir sur l'évaluation du travail.

Supposons que, à un certain instant, le moment du frottement l'emporte sur celui de la charge, le levier sera soulevé, et si ω représente sa vitesse angulaire, Σmr^2 son moment d'inertie par rapport à l'axe, y compris celui de la charge, on aura en chaque instant

$$\Sigma FR = Pl + \frac{d\omega}{dt} \Sigma mr^2.$$

Désignons par α l'angle que fait, à un instant quelconque, avec une droite fixe menée par le centre de la poulie, un rayon passant par un point déterminé A de cette poulie, par α' l'angle que fait avec la même droite fixe la ligne qui joint le centre à un point B du levier; le travail élémentaire du frottement sera égal au produit du moment ΣFR par le déplacement angulaire du levier du frein par rapport à la poulie. Celui-ci se compose de l'angle $d\alpha$ décrit par le point A de la poulie diminué de l'angle $d\alpha'$ décrit par le point B du levier, par suite de son mouvement d'ascension. Pendant que le levier passe d'une position définie par un angle α_1 à une autre position définie par l'angle α_2 , l'angle α

décrit par le point A de la poulie passe de la valeur a_1 à la valeur a_2 , et le travail total du frottement, pendant ce temps, est donné par l'expression

$$Pl(a_2 - a_1) - Pl(a'_2 - a'_1) - \Sigma mr^2 \int_{a'_1}^{a'_2} \frac{d\omega}{dt} da' + \Sigma mr^2 \int_{a_1}^{a_2} \frac{d\omega}{dt} da.$$

Ou bien, en remarquant que $\frac{da'}{dt} = \omega$,

$$Pl(a_2 - a_1) - Pl(a'_2 - a'_1) - \frac{1}{2} \Sigma mr^2 (\omega_2^2 - \omega_1^2) + \Sigma mr^2 \int_{a_1}^{a_2} \frac{d\omega}{dt} da.$$

Si, après avoir exécuté une ascension, le levier revient à sa position première, le travail du frottement, pour cette nouvelle course, sera représenté par une expression analogue; faisons la somme des travaux du frottement pour une oscillation complète, le premier terme deviendra PlA , A étant l'angle total décrit par la poulie, le deuxième et le troisième disparaîtront; quant au quatrième, nous remarquerons que $\frac{da}{dt}$ est la vitesse angulaire Ω de l'arbre de la machine qui, ainsi qu'on l'a exposé plus haut, doit être sensiblement constante pendant tout l'essai, et dont, par suite, les variations pendant une oscillation du frein sont complètement négligeables; la valeur de

$$\Sigma mr^2 \int_{a_1}^{a_2} \frac{d\omega}{dt} da$$

est donc égale à

$$\Sigma mr^2 \Omega (\omega_2 - \omega_1),$$

qui devient nulle pour chaque excursion.

Il résulte de là que, quelles que soient les variations de serrage ou de desserrage dans le cours d'un essai fait avec un frein équilibré, le travail développé par le frottement sera représenté par le produit APl , qui, d'après nos notations, équivaut à $2\pi mPl$, c'est-à-dire par la quantité qu'on évalue effectivement dans tout essai. Remarquons toutefois que, pour qu'il en soit ainsi, il faut qu'il n'y ait aucune perte de force vive du levier à l'extérieur; par suite, dès qu'il y a choc du levier contre les arrêts, l'essai devient inexact.

Dans tout ce qui précède, on n'a tenu aucun compte de l'effort que

doit faire l'opérateur pour serrer ou desserrer le frein; cet effort, qui, ainsi que nous le verrons plus loin, est ordinairement très-considérable, varie, pendant l'opération, en intensité et en direction; pour que ces actions n'aient pas d'influence sur le mouvement du frein et ne compromettent pas par suite l'exactitude des résultats, le mode de serrage des écrous doit être disposé de telle sorte que le moment de l'effort nécessaire pour les faire tourner dans un sens ou dans l'autre, par rapport à l'axe de rotation, soit constamment nul.

Conditions d'exactitude de l'essai. — Les considérations précédentes nous ont fait connaître que, pour qu'un essai au frein donne des résultats exacts, il faut, indépendamment de la condition relative à l'égalité des vitesses initiale et finale qui a été examinée plus haut :

1° Que le moment, par rapport à l'axe de rotation, du poids propre du frein, celui de la charge et celui des efforts nécessaires pour le serrage et le desserrage restent constants dans les différentes positions que peut prendre le levier pendant ses oscillations;

2° Que par suite de ces oscillations le frein ne vienne jamais rencontrer les arrêts fixes.

Nous allons examiner en détail les précautions qu'il convient de prendre pour que ces deux conditions soient remplies dans les expériences.

Moyens pratiques à employer pour assurer la constance des moments des forces.

Moment de la charge. — Pour rendre constant le moment de la charge du frein, on attache le plateau au levier à l'aide d'une courroie qui passe sur un arc en fer ayant pour centre celui de l'arbre; d'après la Notice de M. de Saint-Léger, ce correctif a été employé pour la première fois par M. Fourneyron; il est appliqué aux freins décrits plus loin (*fig. 4, 6 et 7*).

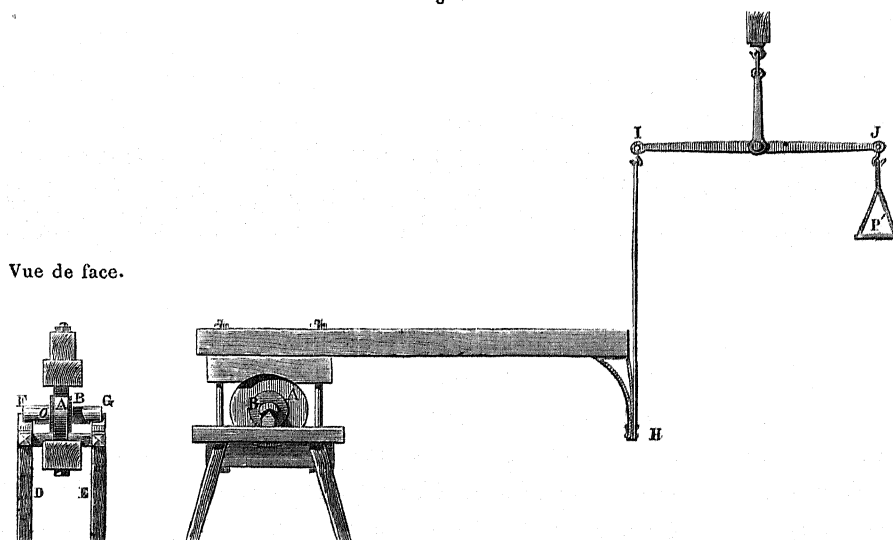
Moment du poids du frein. Tare. — Le moment du poids propre du frein ne peut être rigoureusement constant pour toutes les positions que si l'appareil est équilibré autour de l'axe de rotation; c'est le cas

du frein de Prony (*fig. 3*) et du frein circulaire (*fig. 7*). Lorsque le centre de gravité de l'appareil se trouve sur l'horizontale de l'axe, ainsi que cela a lieu pour les freins à deux barres parallèles (*fig. 5* et *6*), les variations du moment du poids deviennent complètement négligeables pour les amplitudes ordinaires des oscillations, et l'on arrive au même degré d'exactitude qu'avec les freins équilibrés.

Il est nécessaire de déterminer exactement ce moment qui, ainsi que nous l'avons vu, doit être pris en considération dans le calcul du travail. Voici comment on opère :

On construit un disque en bois A (*fig. 2*) ayant exactement le dia-

Fig. 2.



mètre de la poulie du frein; sur chaque face du disque est fixée une rondelle en fer B, percée d'une ouverture centrale O, dans laquelle passe un cylindre en acier FG évidé dans le bas, par lequel l'ensemble peut reposer sur des couteaux placés sur les supports D et E. On équilibre le disque autour de son axe, puis on monte sur lui le frein que l'on serre de manière à l'amener exactement dans la position moyenne qu'il doit occuper sur la poulie pendant l'essai, et on le maintient dans cette position à l'aide de cales.

A une certaine distance au-dessus du frein est établi un fléau de ba-

lance dont l'une des extrémités I se trouve sur la direction de la tangente verticale à l'arc qui est fixé sur le levier; on accroche une courroie d'un côté à cette extrémité I, de l'autre à la partie inférieure II de l'arc du levier; on enlève les cales et l'on détermine le poids P' qu'il faut suspendre à l'autre bout J du fléau pour maintenir le frein dans sa position normale.

On connaît ainsi le moment pq du poids du frein par rapport à l'axe; il est égal à $P'l$. Le poids P' se nomme *tare du frein*.

Pour que la détermination de la tare se fasse dans de bonnes conditions, il faut que le frein disposé sur le disque, comme il vient d'être dit, soit dans la condition d'une balance parfaitement sensible, et c'est ce qui arrive en effet quand, ainsi que nous le supposons, le centre de gravité de l'appareil est sur l'horizontale de l'axe. Avec les précautions que nous venons d'indiquer, un frein du poids de 700 kilogrammes peut être taré à 200 grammes près.

Quand on veut avoir recours à un appareil équilibré autour de son axe, on fait une opération analogue, à titre de vérification; si l'équilibre n'existe pas pour toutes les positions, on corrige les inégalités par l'addition de lames de plomb convenablement réparties.

Lorsque le centre de gravité du frein ne tombe pas sur l'horizontale de l'axe, ainsi que cela arrive pour les freins ordinairement employés, la tare ne peut plus être obtenue avec la même précision; en opérant comme il vient d'être dit, c'est-à-dire en prenant le moment du poids par rapport à l'axe de l'arbre, ainsi que l'exige l'application rigoureuse de la formule, on met le frein dans la position d'une balance folle ou d'une balance paresseuse. Pour faire une bonne pesée, on est alors conduit à placer le couteau, non plus au centre du disque, mais en un point de la verticale passant par ce centre situé sur l'horizontale du centre de gravité de l'appareil; cette opération est délicate, et la tare qui n'est pas obtenue par rapport à l'axe de rotation réel ne présente aucune garantie d'exactitude. C'est, à notre avis, un des plus graves inconvénients des freins ordinairement employés. Dans les essais industriels, on se préoccupe peu, en général, de la position du centre de gravité du frein pendant le tarage; on se contente de faire reposer l'appareil sur un couteau placé sous la mâchoire supérieure; la sensibilité à laquelle on arrive varie ainsi suivant la disposition du frein

et devient souvent tout à fait insuffisante. C'est en se trouvant en présence de pareils inconvénients que M. Demondesir a eu l'idée de monter le frein sur un disque en bois, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut.

En général on détermine la tare avant de faire les essais : cette opération préalable est nécessaire pour permettre de régler convenablement la position du centre de gravité ; mais si l'on tient à une mesure exacte, il est indispensable de refaire la tare immédiatement après le dernier essai. Pendant l'expérience même, le frein est fortement mouillé, et l'eau ainsi ajoutée aux mâchoires et à une partie des leviers peut apporter des modifications notables à la tare.

Moment de l'effort nécessaire pour le serrage. — Le moment des efforts à exercer sur les écrous pour produire le serrage ou le desserrage doit être constamment nul ; cette condition se trouve remplie quand les efforts agissent toujours dans un plan qui passe par l'axe de l'arbre, elle est remplie également quand l'action se compose d'efforts égaux agissant en sens inverse l'un de l'autre aux deux extrémités d'une clef double montée sur l'écrou ; mais il est évident que la volonté de l'opérateur peut jouer un grand rôle, et introduire des forces inutiles pour le serrage et nuisibles à l'exactitude des résultats, en augmentant ou en diminuant l'action de la charge du frein. Pour que l'appareil fût à l'abri de toute critique, il faudrait que l'introduction de pareilles forces fût rendue impossible par la disposition même des écrous et des clefs de serrage, ce qui ne serait pas irréalisable dans la pratique ; mais on peut se contenter d'adopter une disposition qui permette de faire le serrage sans altérer la charge du frein. Une telle disposition suffit d'autant plus en général que, dans tout essai bien fait, le frottement est maintenu sensiblement constant, à l'aide des mesures que nous indiquerons plus loin, en sorte qu'il n'est nécessaire de toucher aux appareils de serrage que par intervalles.

Moyens à employer pour limiter les oscillations.

Lorsqu'un essai est arrivé à sa marche normale, que le levier a été amené dans la position horizontale par un serrage et une charge con-

venables, la seule cause qui puisse lui faire prendre un mouvement est une variation dans le frottement des mâchoires contre la poulie; quand le mouvement a commencé, il ne peut être arrêté, et le frein ne peut être ramené à sa position normale que par une modification dans le serrage.

Pour qu'un essai puisse se faire dans de bonnes conditions, il faut donc :

1° Que le frottement reste sensiblement constant; on évite ainsi la production des oscillations, ou du moins on en diminue l'énergie;

2° Que la manœuvre des écrous se fasse sans grand effort et soit disposée commodément pour l'action de l'opérateur;

3° Que la vitesse des oscillations soit rendue assez petite pour que le serrage ou le desserrage puisse toujours être effectué avant que le levier ne rencontre les arrêts fixes.

Frottement et serrage. — La réalisation des deux premières conditions constitue la véritable difficulté des essais au frein; l'impossibilité de les remplir d'une manière satisfaisante, quand il s'agit de mesurer un travail considérable, a toujours été un obstacle à des essais sérieux faits, avec le frein de Prony, sur des machines très-puissantes.

Pour obtenir la constance du frottement, on se sert d'une poulie à jante tournée, parfaitement centrée sur l'axe; les surfaces frottantes sont maintenues, pendant toute la durée de l'essai, à la même température et dans le même état de lubrification. Pour que, avec un appareil donné, l'effort nécessaire au serrage soit réduit au minimum, il faut que le coefficient de frottement soit augmenté autant que possible; ce serait donc un grand progrès de trouver un enduit qui rendit ce coefficient à la fois grand et régulier. On arrive à une régularité parfaite, et l'on évite en même temps l'échauffement des surfaces frottantes, en arrosant la poulie et les mâchoires d'eau pure; mais, ainsi que l'a constaté M. Demondesir dans des expériences précises faites avec un frein spécial (*fig. 6*), à l'aide duquel des lames de ressort permettaient d'évaluer la pression, le coefficient de frottement des mâchoires sur la poulie descend avec ce mode de lubrification à environ 0^m,05. C'est donc dans la disposition propre des écrous de serrage qu'il faut chercher la solution de la difficulté. Nous indiquerons

plus loin les dispositions diverses qui ont été essayées à cet égard, et nous signalerons celles qui ont déjà donné des résultats importants. Nous nous bornerons à remarquer ici qu'il sera toujours très-avantageux de donner à la poulie du frein la plus grande dimension possible, et que, si l'on doit opérer sur une machine munie d'un volant tourné, servant de poulie de transmission, circonstance qui se rencontre fréquemment aujourd'hui, il ne faut jamais renoncer à cette précieuse ressource pour l'essai au frein.

Moyen de ralentir les oscillations. — Quelque facile que soit la manœuvre des écrous, elle exige toujours un certain temps avant d'arrêter le mouvement du levier du frein; il faut donc que les oscillations soient rendues assez lentes pour permettre d'exécuter cette manœuvre avant que le levier ne vienne toucher l'un ou l'autre des deux arrêts. Or l'accélération angulaire d'un point du levier est donnée par la relation

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Sigma FR - Pl}{\Sigma mr^2},$$

dans laquelle Pl est une constante; le seul moyen de ralentir les oscillations est donc de donner une valeur suffisamment grande au moment d'inertie de l'appareil; à ce point de vue, il y a avantage à éloigner le plateau le plus possible de l'axe de rotation.

Stabilité du frein. — Dans le cas où l'on emploie un frein non équilibré et dans lequel le moment de la charge ne reste pas constant, on peut disposer le système de telle sorte que, s'il y a augmentation ou diminution du moment du frottement, les moments de la charge et du poids du frein varient en sens inverse et éteignent ainsi les oscillations; c'est ce qui arrive lorsque le centre de gravité de l'appareil se trouve au-dessous de l'horizontale passant par l'axe et que le plateau est suspendu à un levier également placé au-dessous, sans que l'on ait recours à un arc de cercle pour maintenir la constance du moment de la charge. On obtient de cette manière une grande stabilité de l'appareil; mais, par cela même, on s'expose à des erreurs, ainsi que nous l'avons montré plus haut, erreurs qui, à la vérité, peuvent être faibles dans certains cas, mais qui n'en existent pas moins en principe et qui peuvent prendre

souvent une importance capitale; on a fait voir que ces dispositions conduisent en outre à d'autres incertitudes non moins grandes dans l'opération du tarage du frein.

Un appareil construit dans les conditions d'exactitude rigoureuse que nous avons indiquées se mettra en mouvement sous l'influence de la moindre variation du frottement, et il sera nécessaire, chaque fois, de faire varier le serrage pour ramener le levier à sa position horizontale. Les essais ainsi dirigés exigent beaucoup de soins, mais ils conduisent du moins à des résultats certains; j'ai tenu à m'assurer, par une expérience directe, de la possibilité pratique de ce mode d'opérer, et je puis affirmer n'avoir rencontré aucune espèce de difficulté par l'emploi d'un frein circulaire équilibré. Néanmoins il est utile de remarquer que, dans des essais d'une certaine durée, il peut se présenter de légères variations de frottement, se produisant pendant un temps très-court, se compensant en partie pendant la marche, et d'importance assez minime pour n'avoir aucune influence appréciable sur les résultats; il peut être avantageux de disposer l'appareil de telle sorte que, pour ces faibles variations, la manœuvre de l'écrou devienne inutile; on arrivera à ce résultat en ajoutant au frein, préalablement équilibré, un poids supplémentaire placé dans la verticale passant par l'axe de rotation, au-dessous de cet axe; il sera facile, dans chaque cas, de calculer ce poids de telle sorte que l'erreur maxima qui peut en résulter soit une fraction de cheval aussi faible qu'on peut le désirer. Ce poids additionnel devra naturellement varier suivant l'importance de la machine que l'on veut essayer, car il faut bien remarquer que l'erreur qui peut résulter de ce que le centre de gravité de l'appareil est au-dessous de l'axe ne dépend que de la vitesse de la poulie et du moment de poids du frein par rapport à l'axe de l'arbre, et nullement de la grandeur du travail que l'on veut mesurer.

Conclusions.

Nous concluons de l'étude à laquelle nous venons de nous livrer :

1° Que, pour faire un essai au frein dans des conditions d'exécution facile, il faut, avant tout, prendre toutes les mesures nécessaires pour assurer l'uniformité du frottement et la facilité du serrage;

2° Que pour obtenir des résultats exacts il faut se servir d'un appareil équilibré ou dont le centre de gravité soit sur l'horizontale de l'axe, et dans lequel la charge agisse toujours à une distance constante de cet axe;

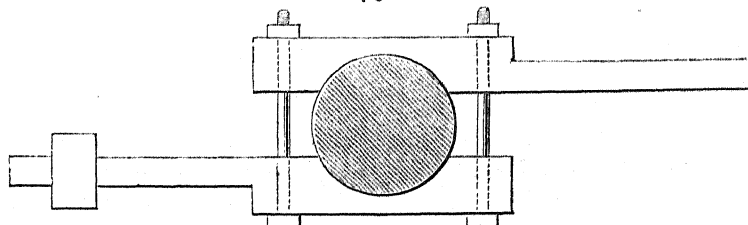
3° Que, lorsque cette dernière condition n'est pas remplie, l'approximation des résultats obtenus est d'autant plus faible que les variations des moments de la charge et du poids du frein sont plus grandes pendant les oscillations du levier; que, par suite, toutes les dispositions dans lesquelles on obtient la stabilité de l'appareil à l'aide de variations de ce genre doivent être rejetées, quand il s'agit d'évaluations exactes.

Les notions qui précèdent nous permettront d'apprécier les avantages et les inconvénients des divers modèles de freins qui sont employés ordinairement.

EXAMEN DE DIVERS SYSTÈMES DE FREINS.

Frein ordinaire à levier supérieur ou inférieur. — Le frein primitif de Prony est représenté par la *fig. 3*, qui est la reproduction fidèle de

Fig. 3.



celle du Mémoire de l'inventeur. L'appareil est équilibré, mais le moment de la charge est variable avec la position du levier; on a depuis longtemps renoncé à cette disposition qui était parfois très-gênante pour l'installation, et l'on a adopté généralement la disposition de la *fig. 1*, page 58, dans laquelle la mâchoire inférieure est souvent remplacée par une série de voussoirs maintenus par une bande en fer. Cet appareil n'est pas équilibré et le moment de la charge est variable, ce qui, dans certains cas, peut conduire à des erreurs assez considérables, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte.

Si le levier restait horizontal pendant tout l'essai, le travail serait exactement donné par l'expression

$$2\pi n(Pl + pq);$$

si le frein était maintenu pendant tout le temps près de l'arrêt supérieur ou près de l'arrêt inférieur, il faudrait mettre dans le plateau des poids P' ou P'' différents du premier et dont les valeurs seraient données par les égalités

$$(1) \quad Pl + pq = P'l' + pq' = P''l'' + pq'',$$

dans lesquelles l', q', l'', q'' représentent les longueurs exactes des bras de levier dans ces positions extrêmes; l'expression prise pour la mesure du travail serait donc

$$2\pi n(P'l' + pq) \quad \text{ou} \quad 2\pi n(P''l'' + pq);$$

en sorte que la différence entre les deux résultats extrêmes que l'on peut obtenir est

$$D = 2\pi nl(P' - P''),$$

expression dans laquelle il faudrait donner à P' et P'' les valeurs tirées des égalités (1), ce qui conduirait à

$$(2) \quad D = 2\pi nl \left[\frac{(Pl + pq)(l'' - l') - p(q'l'' - q''l')}{l'l''} \right].$$

Supposons, pour faire une application, que la poulie du frein ait 1^m,50 de diamètre, que le plateau soit placé à une distance $l = 1^m,50$ de l'axe; admettons de plus que le levier soit disposé au-dessous de l'arbre, ce qui mettrait le crochet à environ 1^m,25 au-dessous de l'horizontale de l'axe, dans la position moyenne; permettons des oscillations de 3 degrés de chaque côté de la ligne qui joint le crochet de suspension au centre; c'est là un minimum qu'il est souvent difficile d'atteindre: un frein dans ces conditions pèserait environ 200 kilogrammes, en y comprenant les fers et appareils de serrage, et son centre de gravité serait très-voisin de la verticale de l'axe; supposons-le à environ

0^m,55 du centre de rotation, on trouverait très-approximativement, d'après ces données,

$$l = 1,50, \quad q = 0,06,$$

$$l' = 1,44, \quad q' = 0,03,$$

$$l'' = 1,56, \quad q'' = 0,09,$$

$$p = 200.$$

La substitution de ces valeurs dans l'expression (2) nous donne, pour la différence totale entre les résultats extrêmes,

$$D = 2\pi n \left[(Pl + pq) \frac{1}{12,5} + 11,09 \right].$$

On pourrait donc, dans les hypothèses indiquées plus haut, trouver des mesures différant environ du treizième de la force totale augmenté d'une quantité qui dépend de la vitesse de la machine et qui serait voisine d'un cheval pour une vitesse de 60 tours à la minute. On est obligé souvent d'opérer sur des arbres qui font jusqu'à 150 tours à la minute; la deuxième partie de l'erreur possible dépasserait alors deux chevaux.

Dans le cas où l'on se servirait du même appareil renversé, c'est-à-dire où l'on placerait le levier au-dessus de l'arbre, l'erreur possible serait ordinairement un peu diminuée, parce que le crochet serait plus rapproché de l'horizontale de l'axe; on trouverait alors

$$l = 1,50, \quad l' = 1,45, \quad l'' = 1,54,$$

et

$$D = 2\pi n \left[(Pl + pq) \frac{1}{16,5} + 11,30 \right].$$

Il est évident que, dans l'un et l'autre cas, l'erreur augmente avec le rayon de la poulie du frein, et diminue à mesure que le point de suspension s'éloigne de l'axe.

Si donc on veut se servir du système imparfait que nous venons de décrire, il y a avantage, au point de vue de l'erreur possible, à disposer le levier sur la mâchoire supérieure, et surtout à donner une assez grande longueur à ce levier; il faut remarquer pourtant que, quand le système a la première des deux dispositions que nous venons d'indiquer, c'est-à-dire quand le levier est en dessous, l'appareil est plus

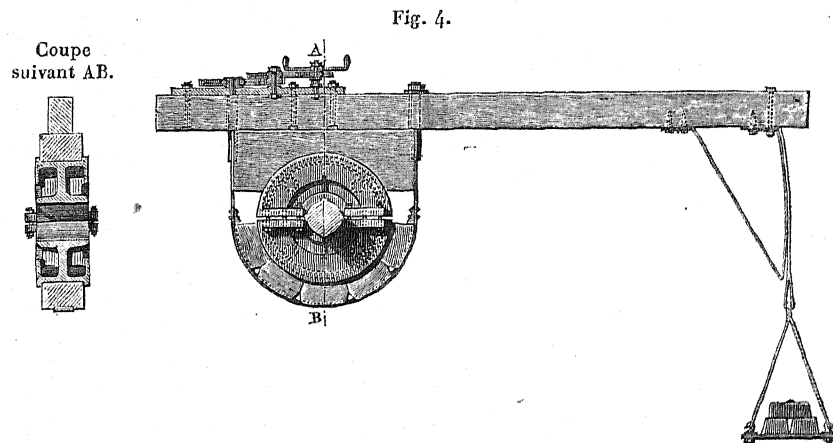
stable; lorsqu'il se produit une variation dans le frottement, le levier peut prendre une nouvelle position d'équilibre sans que l'opérateur soit obligé de manœuvrer les écrous, et par suite de remettre le système dans la position normale, tandis que, dans le deuxième cas, dès qu'une oscillation est commencée pour un motif quelconque, les moments des forces varient de manière à accélérer le mouvement, en sorte que, si l'on ne veut pas toucher les arrêts, il faut immédiatement manœuvrer les écrous. Cette deuxième disposition est donc moins commode que la première, mais elle a l'avantage d'exiger une attention continuelle de la part de l'opérateur qui se trouve obligé ou de corriger immédiatement les variations qui se produisent, ou de laisser manquer l'essai; quoique cette manière d'opérer soit plus difficile, qu'elle exige plus de soins, plus d'attention et des dispositions permettant un serrage plus facile, elle offre bien plus de garanties d'exactitude que la première.

Aux causes d'erreurs considérables que nous venons de signaler pour le système qui nous occupe, il faut en ajouter une autre non moins importante provenant de la tare. Nous avons indiqué les précautions qu'il faut prendre à ce sujet, et la difficulté sérieuse que l'on rencontre dans le cas actuel, où il n'est pas possible d'obtenir le moment du poids du frein par rapport à l'axe réel de rotation pendant l'essai. Il faut ajouter qu'avec ce genre d'appareils la tare varie pendant l'expérience, parce que l'eau vient imprégner les mâchoires et une partie du levier.

Dans cette sorte de frein, qui est la plus répandue dans l'industrie, on produit ordinairement le serrage en agissant directement sur l'un ou l'autre des deux écrous à l'aide d'une grande clef. La manœuvre est très-dure et souvent il faut plusieurs hommes pour l'exécuter; le serrage et le desserrage ne peuvent guère se faire sans imprimer des secousses au frein; en tout cas, l'effort appliqué sur le levier de l'écrou tend à faire tourner le frein autour de l'arbre dans un sens ou dans un autre, et l'on introduit ainsi forcément de nouvelles incertitudes dans l'essai.

Freins en usage dans le Service des Tabacs. — En 1852, M. Rolland, qui, dans des expériences faites antérieurement à Lyon, avait reconnu

tous les inconvénients du système dont nous venons de parler, employa le frein représenté *fig. 4*, auquel le constructeur, M. Farcot, confiant

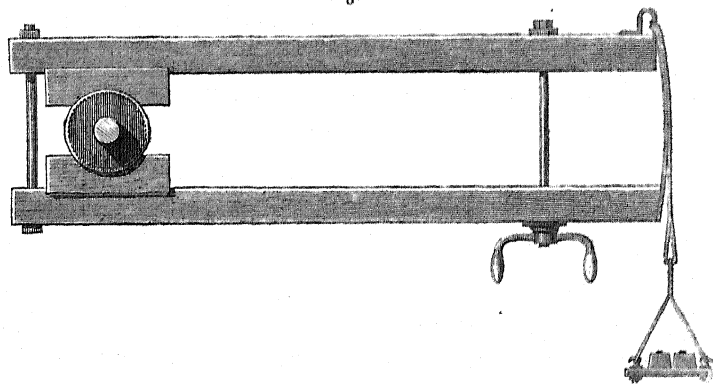


dans la valeur de ses machines, n'avait pas craint d'appliquer une partie des perfectionnements indiqués dans la Note de M. de Saint-Léger. Le moment de la charge est maintenu constant à l'aide d'un arc en fer, mais le frein n'est pas équilibré, et le centre de gravité se trouve au-dessus de l'horizontale de l'axe; toute erreur n'est donc pas rendue impossible par ce système; cependant les résultats obtenus ont été très-satisfaisants, ce qui tient au soin que l'on a mis à éviter les variations du frottement, et à la facilité du serrage par la disposition adoptée. Cette manœuvre s'effectue à l'aide d'une clef double qui agit sur l'écrou par une série de roues et de pignons, suivant les indications de M. de Saint-Léger. Il faut dire toutefois que l'effort du serrage est plus grand que ne semble l'indiquer le rapport des roues d'engrenage; cela tient à la production de frottements très-considérables dans ces organes qui sont constamment mouillés pendant l'essai, et probablement aussi à un défaut de rigidité complète des petits arbres des renvois qui, n'étant maintenus que par une extrémité, sont exposés à se fausser et à donner naissance à des arc-boutements; ces inconvénients seraient considérablement réduits si, au lieu d'une plaque unique de fixation, on établissait, sur le levier, une caisse en fonte recevant sur ses deux faces horizontales les deux extrémités des arbres des roues.

La poulie du frein qui était creuse, de manière à pouvoir recevoir un jet d'eau destiné à prévenir l'échauffement de l'appareil, avait 0^m,83 de diamètre; elle était montée sur un arbre qui faisait en moyenne 55 tours par minute; dans ces conditions, M. Rolland a mesuré avec précision des travaux de vingt-cinq chevaux, et le frein a été maintenu sensiblement horizontal pendant onze heures. Le même frein a été employé plus tard à la Manufacture de Paris; monté sur un arbre qui faisait 85 tours, il a mesuré facilement des forces de cinquante chevaux, et dans plusieurs expériences ce chiffre a pu être élevé jusqu'à soixante-quinze chevaux.

Frein à deux leviers parallèles. — Le frein que nous venons de décrire laisse encore à désirer sous le rapport du serrage et sous celui de la position de son centre de gravité. En 1860, à l'occasion de la réception des machines de la Manufacture de Lille, M. Rolland chercha à éviter ces deux inconvénients, et fit construire, d'après les indications de M. le général Poncelet, le frein représenté *fig. 5*. Les deux mâchoires

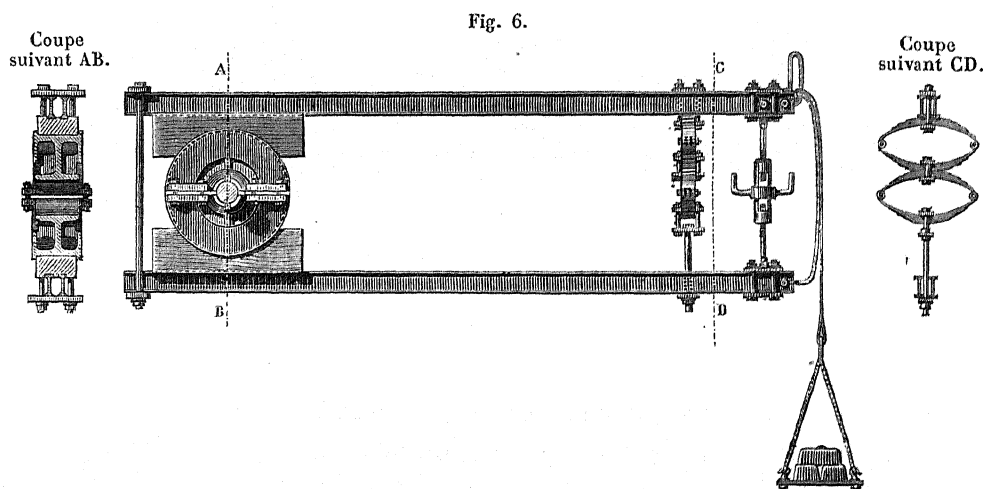
Fig. 5.



en bois sont maintenues par deux leviers parallèles qui se prolongent du même côté de l'arbre; ils sont solidement reliés à l'une de leurs extrémités, près des mâchoires, par un fort boulon vertical; le serrage se fait vers l'autre extrémité des leviers, à l'aide d'un écrou à clef engagé dans un boulon vertical qui traverse les deux pièces; le plateau est suspendu à l'aide d'une courroie qui passe sur un arc en fer réunissant les bouts des barres.

Ce frein, dont le centre de gravité est sur l'horizontale de l'arbre, donne la même exactitude qu'un frein équilibré; l'effort du serrage est notablement réduit; l'opérateur est commodément placé, loin des arbres tournants, à l'abri des projections d'eau, et près du plateau qui reçoit les poids. On a facilement mesuré avec cet appareil, monté sur un arbre qui faisait 140 tours par minute, une puissance de quarante-deux chevaux donnée par une machine de Woolff.

En 1861, à propos des essais de la Manufacture de Châteauroux, M. Démondesir apporta plusieurs modifications importantes à l'appareil que nous venons de décrire, dans le but de lui permettre de résister à de plus grands efforts et de mesurer des travaux plus considérables. La nouvelle disposition est représentée *fig. 6*. Les leviers en bois sont

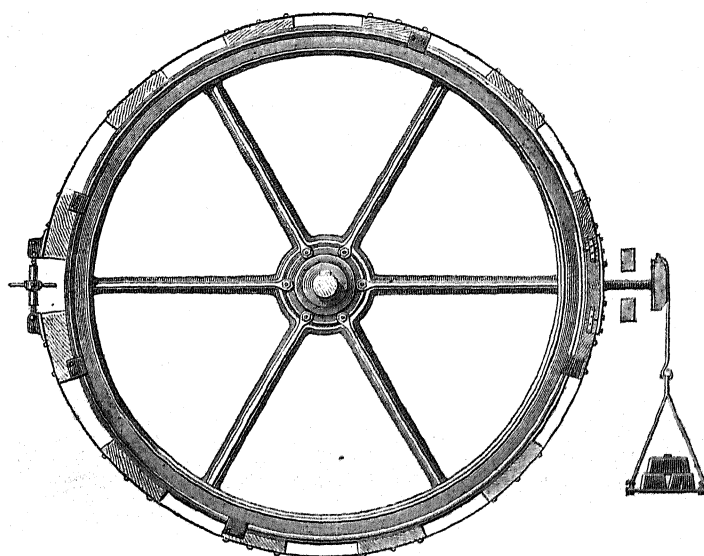


remplacés par de doubles fers à T; la flexion est ainsi diminuée et la tare reste constante pendant l'essai, malgré l'arrosage du frein. Le serrage se fait par un écrou double agissant sur deux vis de pas contraire; un double système de ressorts en acier préalablement bandés est interposé entre les deux leviers et produit le serrage nécessaire en moyenne, en sorte que l'effort qu'il faut exercer sur l'écrou, pour corriger les oscillations, devient très-faible. La poulie du frein avait 0^m,84 de diamètre, l'arbre sur lequel elle était montée faisait 132 tours; dans ces

conditions on a mesuré jusqu'à soixante-cinq chevaux; la flexion permanente qu'ont prise les fers à T a seule empêché d'aller plus loin.

Frein circulaire. — En 1862, je me servis, pour les essais de la machine de la Manufacture des Tabacs de Paris-Reuilly, d'un frein circulaire représenté *fig. 7*. L'appareil se compose d'une série de voussoirs

Fig. 7.



en bois fixés sur une bande en fer; le serrage se fait à l'aide d'un écrou double engagé dans deux vis de pas contraire fixées aux extrémités de la bande. Le frein est équilibré par rapport à l'axe; les voussoirs sont répartis symétriquement; cette disposition a l'avantage de conserver une tare très-sensiblement constante pendant l'essai, malgré l'arrosage de la poulie, et de permettre des oscillations du levier beaucoup plus étendues que dans les autres systèmes, sans qu'il en résulte aucune erreur. Le serrage exige un effort très-faible, et le frein peut être maintenu, dans sa position moyenne, avec la plus grande facilité.

L'emploi de ce frein est particulièrement avantageux dans le cas où il peut être monté sur des poulies de grand diamètre et surtout sur des volants tournés. Le volant de la machine de Reuilly a 4^m,20 de dia-

mètre; j'ai mesuré sans difficulté, à une vitesse de 43 tours, des puissances variant de cinq à vingt-huit chevaux, et il m'eût été très-facile d'aller beaucoup plus au delà ⁽¹⁾.

En résumé, nous pouvons conclure des nombreuses expériences qui ont déjà été faites que, chaque fois que l'on ne peut employer qu'une poulie de petit diamètre, le frein le plus facile à manœuvrer, tout en donnant des résultats exacts, est le frein à barres parallèles construit par M. Rolland d'après les indications du général Poncelet, et, s'il s'agit de travaux considérables, ce frein modifié par M. Demondesir; chaque fois que l'on peut disposer d'une grande poulie et surtout d'un volant tourné, il ne faut pas hésiter à employer le frein circulaire. Les erreurs possibles avec ces divers appareils sont réduites à l'erreur commise sur la tare, qui, à l'aide des précautions que nous avons indiquées à cet égard, devient complètement négligeable.

(¹) Depuis cette époque, on a construit plusieurs freins circulaires de diverses dimensions, à l'aide desquels on a exécuté des essais sur les machines motrices des Manufactures de Tabacs de Marseille, de Nancy, de Tonneins, et sur un grand nombre de locomobiles.