

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - http://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA GRANDE MONOGRAPHIE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Sauvage, Louis Auguste Édouard
Auteur(s)	Sauvage, Louis Auguste Édouard (1850-1937)
Auteur(s) secondaire(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France)
Titre	Cours de machines
Adresse	[Paris] : [Conservatoire national des arts et métiers], 1907-1914
Collation	4 vol.
Nombre de volumes	4
Sujet(s)	Machines -- Manuels d'enseignement supérieur
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?4DE89_91
LISTE DES VOLUMES	
	Cours de machines à vapeur
	Cours des machines précédemment de mécanique appliquée aux arts : année 1907-1908
	Cours de machines : année 1910-1911 : mesure de la puissance des moteurs : résumé de leçons faites en novembre et décembre 1910
	Cours de machines : 1ère année du cours : 1913-1914

NOTICE DU VOLUME	
Auteur(s) volume	Sauvage, Louis Auguste Édouard (1850-1937)
Auteur(s) secondaire(s) volume	Conservatoire national des arts et métiers (France)
Titre	Cours de machines
Volume	Cours de machines : année 1910-1911 : mesure de la puissance des moteurs : résumé de leçons faites en novembre et décembre 1910
Adresse	[Paris] : [Conservatoire national des arts et métiers], [1911]
Collation	1 vol. (9 p.) : ill. ; 31 cm
Nombre de vues	12
Cote	CNAM-BIB 4 De 91 (2)
Sujet(s)	Machines -- Manuels d'enseignement supérieur Moteurs -- Manuels d'enseignement supérieur Énergie mécanique -- Manuels d'enseignement supérieur
Thématique(s)	Histoire du Cnam Machines & instrumentation scientifique
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	20/05/2021
Date de génération du PDF	24/02/2022
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?4DE91.2

4^e De 91⁽²⁾

Conservatoire National des Arts & Métiers.

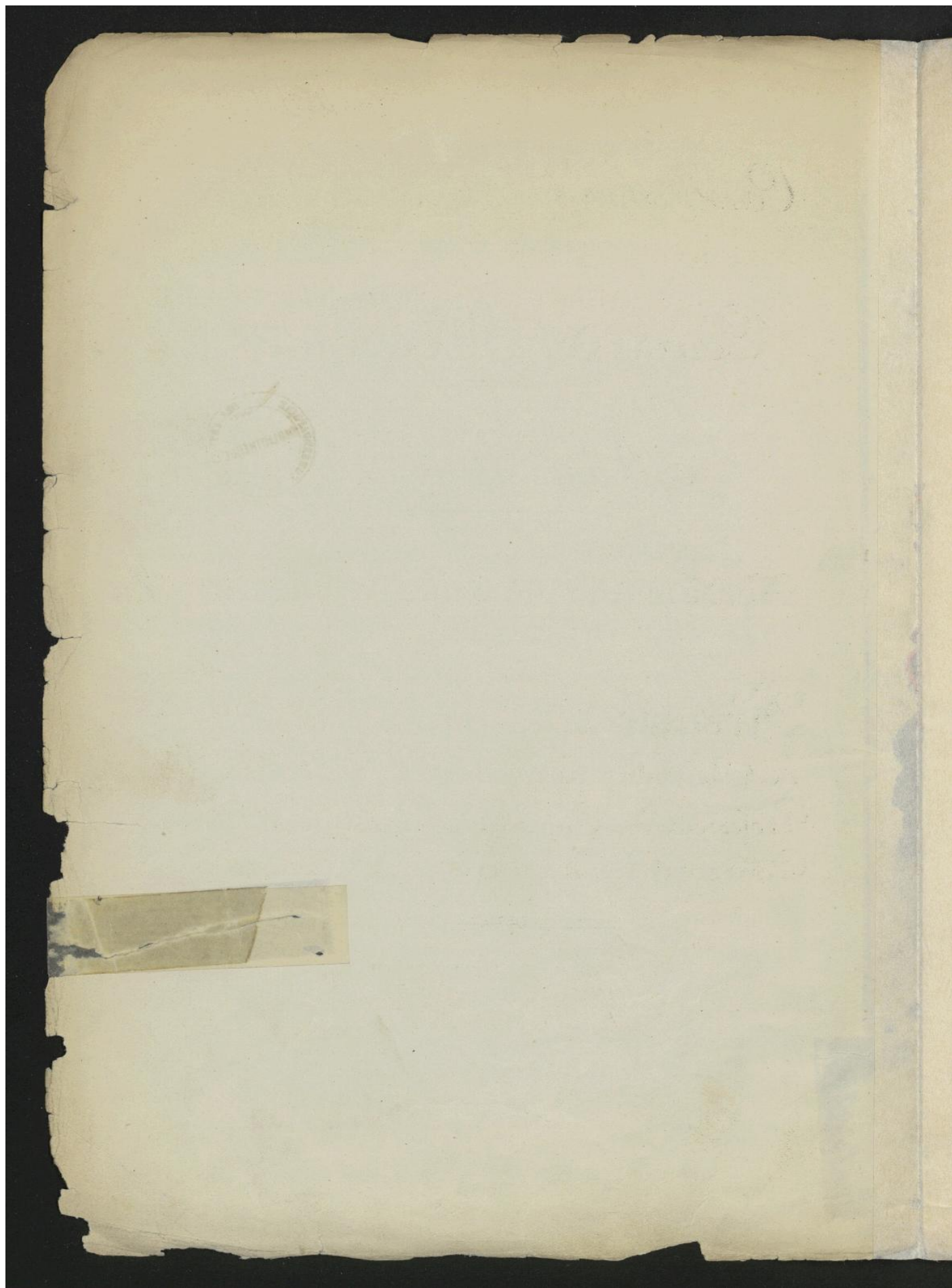
Cours de Machines.

Année 1910-1911.



Mesure de la puissance des Moteurs.

Résumé de Leçons faites en Novembre
et Décembre 1910, par M^r Sauvage,
Professeur du Cours de Machines, au
Conservatoire des Arts-et-Métiers.





Mesure de la Puissance des Moteurs.

Résumé de Leçons faites en Novembre et
Décembre 1910, par Monsieur Sauvage, au
Conservatoire des Arts et Métiers.

La vapeur, agissant par sa pression sur le piston d'une machine, le pousse avec une force qu'on calcule en multipliant la surface du piston, en cm^2 ($\frac{D^2}{4}$, D étant le diamètre du piston en cm) par la valeur de la pression en kg. par cm^2 ; cette force est exprimée en kgf. Le travail produit par la vapeur s'obtient en multipliant la force par le chemin parcouru, course du piston, en supposant cette force constante, ou, en pratique, en considérant la valeur moyenne de cette force, qui est variable pendant la course.

De ce travail moteur, il faut déduire le travail résistant pendant le retour du piston, qui tient à la pression de la vapeur d'échappement refoulée.

Dans la machine à double effet, cas ordinaire, on calcule de même le travail sur la seconde face du piston.

L'indicateur enregistre la valeur de la pression sur une des faces du piston pour toutes ses positions pendant une course aller et retour. Le même appareil sert ensuite pour l'autre face du piston, ou bien on en emploie deux simultanément.

L'indicateur comprend un petit cylindre vertical, (environ 15^{mm} de diamètre) dont le piston est soumis, sur sa face inférieure, à la pression qu'on veut mesurer, et, sur sa face supérieure, à la tension d'un ressort. Quand la pression augmente, ce ressort se comprime de plus en plus et le piston monte.

Le ressort est construit de telle sorte qu'il se raccourcisse d'une même quantité, pour chaque augmentation de 1 kg. par cm^2 de la pression.

Le piston d'indicateur porte une tige avec un crayon qui appuie sur une feuille de papier, dans son mouvement vertical. D'autre part, ce papier se déplace horizontalement en suivant le mouvement du piston de la machine en expérience, réduit dans un rapport convenable.

Le spécimen d'un de ces papiers est ci-joint.

Pour produire commodément le mouvement horizontal du papier, on l'enroule sur un tambour cylindrique oscillant autour de son axe (vertical). L'oscillation est produite dans un sens par la traction d'une ficelle reliée au piston de la machine en expérience, dans l'autre sens, par un ressort de rappel placé dans le tambour.

Cette commande se fait par l'intermédiaire d'une poulie de réduction, composée d'un axe qui porte deux poulies de diamètres inégaux, tournant ensemble. Sur la plus grande s'enroule la ficelle qui vient du piston de la machine en expérience, et sur la plus petite une autre si elle qui entraîne le tambour de l'indicateur. (Si une des ficelles s'enroule quand l'autre se déroule, les ficelles étant constamment tendues par le ressort du tambour de l'indicateur).

L'auteur de l'indicateur, Watt, faisait usage, pour la mesure des pressions, de ressorts à longue course. On préfère aujourd'hui de petits ressorts à faible flexibilité, dont on amplifie la course par un léger mécanisme qui porte le crayon enregistreur.

L'indicateur doit communiquer avec le cylindre en expérience par un tuyau aussi court que possible, dont le diamètre ne soit pas trop petit.

On trace sur le papier la ligne atmosphérique, qui correspond à la pression de l'atmosphère sous le piston d'indicateur, en faisant tourner à la main le tambour, sans admettre de vapeur dans l'indicateur.

Pour chaque ressort employé, on sait quelle est en mm la course du crayon quand la pression varie de 1 kg par cm^2 : on peut donc tracer l'échelle des pressions. En dessous de la pression atmosphérique, jusqu'au vide complet, le ressort d'indicateur travaille par extension.

Cette connaissance de la flexibilité des ressorts s'obtient en soumettant le piston de l'indicateur successivement à des pressions bien exactement mesurées par un manomètre précis et maintenues quelque temps chacune : cette opération du tarage doit être répétée de temps en temps, comme vérification.

Sur le diagramme d'indicateur, il convient de représenter l'espace libre du cylindre en expérience, par une longueur Od (fig. 1), qui sera, par exemple, le 10^e de

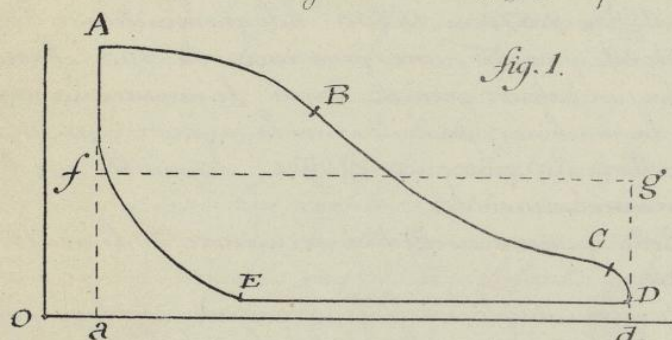


fig. 1.

la longueur ad , signifiant la course du piston, si cet espace libre est le 10^e du volume engendré par le piston dans une course simple, $\frac{D^2 C}{4,273}$.

Le diagramme montre comment la vapeur est distribuée dans le cylindre et permet de vérifier le fonctionnement des orga-

nes de distribution, notamment par la comparaison des diagrammes relevés sur les deux faces. On voit, en AB , l'admission avec laminage vers la fin, en BC , la détente, en C l'ouverture anticipée de l'échappement, et en E le commencement de la compression.

Pour calculer à l'aide du diagramme la puissance de la machine, on détermine l'ordonnée moyenne, ou la pression moyenne de la vapeur, qui donnerait le même travail par tour en poussant le piston pendant l'aller, aucune résistance n'agissant pendant le retour.

Cette ordonnée moyenne est la hauteur af , du rectangle $afgd$, dont la base est égale à la longueur ad , du diagramme et qui a même surface. Pour la calculer, on mesure la surface du diagramme $ABCDEA$ en mm^2 , puis on divise le nombre trouvé par la longueur ad , en mm .

De la hauteur en mm , af , on passe à la pression en kg par cm^2 , sachant, pour chaque ressort employé dans un indicateur donné, à combien de mm correspond une variation de pression d'un kg par cm^2 .

Par exemple, soient 2,7 et 2,8 les ordonnées

4
moyennes sur les deux faces d'un piston de 500^{mm} de diamètre, la course étant de 800^{mm}; soient encore 100 le nombre de tours par minute, 70 mm le diamètre de la tige, supposé du côté de la plus forte ordonnée moyenne. Le travail par tour est, sur chacune des faces du piston :

$$1965 \times 2,7 \times 0,8 = 4240 \text{ kilogrammètres}$$

$$\text{et } (1965 - 38) \times 2,8 \times 0,8 = 4330 \text{ — } 1^{\circ}$$

$$\text{Ensemble } \frac{4240 + 4330}{2} = 8570 \text{ — } 1^{\circ}$$

Par seconde, le travail moyen est égal à :

$$\frac{100}{60} \times 8.570 = 14300 \text{ kilogrammètres.}$$

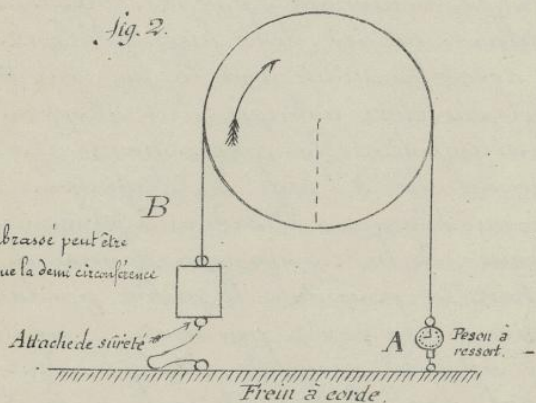
soit, en divisant par 75, une puissance de 190 chevaux.

L'indicateur permet ainsi de mesurer la puissance indiquée de la machine, produite par la vapeur agissant sur le piston. Mais la puissance effective, disponible sur l'arbre, est nécessairement moindre.

Cette puissance effective se mesure à l'aide de dynamomètres.

Le plus simple est le frein à corde, employé pour les petits moteurs. Sur une poulie de l'arbre de la machine (séparée de tous les appareils qu'elle doit commander) on place une corde (fig. 2) attachée

fig. 2.



Nota... L'angle embrassé peut être plus grand que la demi-circconférence

en A à un point fixe et portant en B un poids de P Kg qui serre la corde sur la poulie. Le frottement doit être suffisant pour absorber tout le travail produit, ce qu'on voit quand la machine conserve sa vitesse de régime.

On obtient cet effet en suspendant à la corde un poids convenable, P.

Il s'agit de mesurer le travail de frottement que surmonte dans ces conditions la machine. Or, le frottement consiste en une série de forces agissant tangentiellement à la poulie, en sens contraire du mouvement: toutes ces forces tangentielles tendent à entraîner la corde, et sont équilibrées par le poids qu'elle porte.

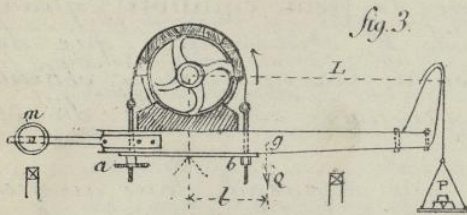
Il y a cependant une petite correction à faire: le brin fixe de la corde en A, éprouve une certaine tension

qui s'ajoute aux forces de frottement. On peut mesurer cette tension de t kg, en amarrant la corde sur un pêne à ressort, et alors le total des forces de frottement est égal à $P.t$. Le travail résistant qu'elles produisent pendant un tour de la poulie est égal à cette force $P.t$ multipliée par le chemin parcouru (la force étant exactement opposée à la direction du mouvement en chaque point où elle s'exerce), chemin égal à la circonférence de la poulie ($6,28 R$, R étant le rayon en mètres).

En une seconde, si la poulie fait $\frac{n}{60}$ tours, le travail sera donc $6,28 R \frac{n}{60} (P.t)$.

En divisant ce nombre par 75, on obtient la puissance effective en chevaux-vapeur.

Ce calcul néglige le diamètre de la corde. En réalité, $P.t$ s'exerce suivant l'axe de la corde, et le chemin parcouru est un peu plus grand. Au cercle de rayon R , il faut substituer dans la formule le cercle de rayon $R+r$, r étant le rayon de la corde.



Le frein de Prony, prototype des dynamomètres, convient pour des puissances plus importantes. Le frottement est produit par une couronne de sabots (fig. 3) serrés contre la poulie, de

manière à absorber tout le travail produit. Le réglage précis de ce serrage est parfois assez délicat.

Il s'agit de mesurer la force tangentielle nécessaire pour empêcher cette couronne d'être entraînée par la poulie. On pourrait équilibrer directement les forces de frottement qui agissent tangentiellement à la poulie par un poids P suspendu sur la couronne à une distance du centre précisément égale au rayon de la poulie; le calcul de la puissance se ferait comme ci-dessus. Mais pour éviter des manœuvres de poids trop lourds, il est préférable d'appliquer la charge à l'extrémité d'un levier l .



6

cette longueur étant comptée à partir de la verticale qui passe par l'axe de rotation de la poulie. Alors au poids P agissant à l'extrémité de la longueur R , on substitue P' agissant sur la longueur L . Le principe du levier donne la relation :

$$P' \times L = P \times R \text{ ou } P = P' \frac{L}{R}$$

Par suite, le travail absorbé en un tour est $6,28 RP$ ou $6,28 RP' \frac{L}{R}$, c'est-à-dire $6,28 L \times P'$.

Le travail en une seconde, la machine faisant $\frac{n}{60}$ tours, est alors $6,28 LP' \frac{n}{60}$, et la puissance en kilowatts, $\frac{6,28 LP' n}{102 \times 60}$.

L'expérience exige qu'on règle simultanément au degré voulu le serrage des sabots et la charge P' .

Ceci suppose le frein équilibré quand il ne porte aucun poids P' , c'est-à-dire que desserré, il doit rester horizontal. Cet équilibre s'obtient par l'addition d'un contre-poids convenable du côté opposé au levier.

Le travail qui disparaît dans un frein se transforme en chaleur. Dans les essais prolongés, un arrosage est nécessaire pour éviter un échauffement excessif de la poulie, qui serait exposée à se rompre par dilatation de la jante.

Des butées solides empêchent des déplacements excessifs et dangereux de levier.

Exemple de calcul :

Poids suspendu à l'extrémité du levier 110 Kg.

Longueur du levier 4 m.

Nombre de tours par minute 150 t.

Le travail par tour est $6,28 \times 4 \times 110 = 2760$ kilogrammètres.

Le travail par seconde $\frac{2760 \times 150}{60} = 6900$ kilogrammètres.

Soit 92 chevaux ou 68 kilowatts.

Au frottement des sabots on peut substituer toute autre action qui s'exerce entre une partie tournante fixée sur l'arbre de la machine et un collier qui entoure cette

partie tournante, ce collier étant libre de tourner autour d'un axe qui se confond avec l'axe de rotation de la machine: pour empêcher ce collier d'être entraîné et le maintenir en équilibre, il faut une force qui est produite, comme dans le frein de Drouy, par un poids suspendu à l'extrémité d'un levier fixé sur le collier.

Le collier, quand aucun poids n'est suspendu, doit être exactement en équilibre sur l'axe commun de rotation.

Un théorème élémentaire de mécanique indique que le produit du poids suspendu, P , par sa distance à l'axe (ou longueur du levier) est égal à la somme des produits de chacune des forces qui se développent entre la partie tournante et le collier maintenu en équilibre, par la distance à l'axe (ce produit est ce qu'on appelle en mécanique le moment de la force).

Par suite le travail est le même que pour la force P agissant seule à l'extrémité du rayon I .

La dynamo-dynamomètre, fort employée pour l'essai des moteurs à pétrole, est une machine dynamo-électrique dont l'induit tourne entre les pôles d'une carcasse qui, au lieu d'être invariablement fixée au sol comme dans la machine ordinaire, est libre de tourner sur des couronnes de billes portées par un bâti fixe: deux butées voisines limitent ce mouvement de rotation, qui on empêche à l'aide d'un poids convenable suspendu à l'extrémité d'un levier que porte cette carcasse, qui ne doit toucher ni l'une ni l'autre des butées.

L'arbre de l'induit est placé dans le prolongement de l'arbre du moteur en essai et lui est adhérent. Les forces qui tendent à entraîner la carcasse sont principalement les actions électro-magnétiques qui produisent le courant électrique dans la machine, puis le frottement des touffes de l'arbre de l'induit dans les coussinets portés par la carcasse, et enfin le frottement des balais qui recueillent le courant électrique.

Toutes ces forces sont équilibrées par le poids P qu'on règle de manière à maintenir immobile la carcasse sans qu'elle touche les butées. Le calcul est identique à celui du frein de Drouy.

Le courant électrique produit est détenu dans un rhéostat ou utilisé d'une manière quelconque.

Dans les dynamomètres hydrauliques, l'intermédiaire entre la partie tournante et le collier déplaçable maintenu en équilibre, qui l'entoure, est une masse d'eau; la partie tournante porte une série de palettes ou chicanes qui passent auprès d'autres chicanes portées par le collier en équilibre, de manière à opposer au mouvement une résistance qui doit être vaincue: l'équilibre se fait toujours de même par un poids P à l'extrémité d'un levier L (longueur depuis l'axe de rotation jusqu'à la verticale du poids P); et le théorème des moments s'applique exactement de même, bien qu'à première vue les actions qui se développent dans l'appareil, entre la partie tournante et celle maintenue en équilibre par l'intermédiaire de l'eau, puissent paraître plus complexes.

Un type de dynamomètre hydraulique applicable à de très puissants moteurs, (jusqu'à 1000 chevaux, par exemple), consiste en une véritable pompe centrifuge comprenant un axe muni d'aubes qui tourne dans une enveloppe équilibrée, laquelle, au lieu d'être fixe par construction, est mobile sur couronnes de galets et équilibrée par un poids P suspendu au levier L . L'eau, refoulée tout autour de la roue à aubes dans l'enveloppe, est ramenée par des conduits ménagés dans cette enveloppe, vers la partie centrale où se fait l'aspiration de la roue à aubes.

La pompe travaille dans ce circuit fermé; pour obtenir une résistance suffisante, le passage de l'eau dans ce circuit est plus ou moins obstrué par un registre réglable à volonté suivant la puissance à assurer.

Le travail absorbé dans ces appareils se transforme en chaleur et, par suite, la température de l'eau s'élève.

Cette température peut s'élever jusqu'à celle d'ébullition et alors l'eau se vaporise et doit être renouvelée.

Plus fréquemment, on renouvelle l'eau d'une manière plus abondante en remplaçant constamment l'eau chaude par l'eau froide à l'aide de dispositifs appropriés.

En mesurant la quantité d'eau employée, par exemple 5000 kg. en une heure, et son échauffement à l'aide de deux thermomètres, l'un à l'entrée, l'autre à la sortie, par exemple de 10° à 25° , on peut calculer le nombre de calories produites, qui sera dans l'espèce de $5000 \times (25-10) = 75.000$.

En rapprochant ce nombre de calories du nombre de

kilogrammes qui disparaissent, on trouve que chaque calorie correspond à 426 kilogrammètres.

Dans l'espèce on a donc absorbé $75.000 \times 426 = 31.900.000$ kilogrammètres en une heure. En divisant par 270.000, nombre de kilogrammètres pour un cheval-heure, on voit que la puissance du moteur (mesurée d'ailleurs directement d'après le poids P et la longueur L , toujours par la même règle) est de 118 chevaux.

Ces expériences pratiques ont donné une confirmation remarquable de la valeur 426 de l'équivalent mécanique de la calorie, établie par diverses expériences de physique.

Après avoir mesuré la puissance indiquée d'un moteur, par exemple 160 chevaux, et sa puissance effective, par exemple 140 chevaux, on peut calculer immédiatement le rendement mécanique de ce moteur qui est le rapport $\frac{140}{160}$, soit 87,5 pour 100.

La différence, 20 chevaux, est absorbée par les résistances du moteur.

Comme la mesure à l'indicateur est relativement facile, tandis que l'essai au frein est souvent coûteux et parfois impossible, on peut se contenter de mesurer à l'indicateur la puissance absorbée par la machine marchant à vide, c'est-à-dire tournant seule sans produire aucun effet utile. Dans l'espèce, on trouverait 20 chevaux, à déduire des 160 chevaux indiqués sur la machine en charge.

Toutefois cette méthode, qui donne un renseignement utile, n'est pas très précise, parce qu'il n'est pas évident que la puissance perdue soit la même sur la machine marchant à vide et en pleine charge.

On remarquera que les expériences qui viennent d'être décrites supposent que le moteur marche pendant quelque temps à l'état de régime avec une vitesse uniforme et en produisant le même travail à chaque tour. Ces conditions sont nécessaires d'ailleurs pour qu'on puisse parler de puissance en chevaux ou en kilowatts. L'indicateur peut d'ailleurs servir quand le régime est variable, mais le diagramme ne reste pas le même à chaque tour.

Nota : Le moulinet dynamométrique Renard sera étudié à l'occasion des moteurs à explosion.

11 Janvier 1911.



