

Étude de l'usure d'une surface plane par un jet d'eau chargé de sable*

Study of the wear of a plane surface by a sand laden
jet of water

PAR CEMIL ILGAZ

PROFESSEUR ADJOINT D'HYDRAULIQUE ET DE L'UTILISATION DES FORCES HYDRAULIQUES
A L'UNIVERSITÉ TECHNIQUE D'ISTANBUL

Etude expérimentale de l'usure de plaques métalliques par un jet d'eau chargé de sable siliceux. Description de l'installation utilisée, des appareils et des méthodes de mesure. Présentation des résultats : usure en fonction de la concentration du sable, de la vitesse, du diamètre du jet et de la nature de la plaque.

Experimental study of the wear of metal plates by a silicate sand laden jet of water. Description of the installation used, the equipment and the measuring methods. The results : wear as a function of the sand concentration, the velocity, the jet diameter and the nature of the plate.

INTRODUCTION

Les phénomènes d'usure par les eaux chargées de particules abrasives posent de graves problèmes aux constructeurs de pompes de dragage et de turbines hydrauliques, soucieux de garantir le rendement et la durée de leurs machines. L'usure est produite par la projection des particules en suspension dans l'eau sur les parois limitant l'écoulement, puis par leur frottement sous l'action des forces hydrodynamiques. Le problème est extrêmement varié et

complexe; il nécessite la connaissance à la fois des trajectoires des particules dans la machine et des lois de l'usure. De plus, les usures par corrosion chimique et par cavitation agissent souvent simultanément avec l'usure par abrasion et en aggravent les effets.

Le but de cette étude est de rechercher les lois de l'usure d'une plaque métallique soumise à la percussion de particules abrasives, à l'aide d'un jet d'eau chargé de sable siliceux.

RÉSUMÉ DES TRAVAUX ANTÉRIEURS EFFECTUÉS SUR L'USURE PAR ABRASION

Les recherches que nous avons faites dans la littérature technique nous ont montré que le

problème d'usure par un jet avait été peu étudié en laboratoire.

Les travaux relatifs à ce sujet peuvent se résumer ainsi :

En 1904, le professeur allemand M. GARY,

(*) Cette étude est extraite d'une thèse présentée par l'auteur à l'Université Technique d'Istanbul.

qui voulait étudier le comportement de différentes sortes de pavé (sous la circulation routière), a exposé huit plaques en pierres naturelles, onze plaques en linoléum artificiel et quatorze plaques en bois à un jet de sable et d'air dont la pression était de trois atmosphères [1]*.

En 1912, le professeur autrichien A. HANISCH soumettait des échantillons de pierres naturelles à un essai de meulage suivi d'un essai d'usure par un jet de sable et d'air. Dans ce dernier cas, la pression du jet était de quatre atmosphères et la durée d'exposition était de deux minutes. Il constatait que si l'échantillon était riche en quartz, l'usure par le meulage était supérieure à l'usure par le jet [2].

En 1931, l'Administration de la Rivière du Colorado a effectué neuf essais sur des plaques carrées en béton, l'eau qui alimentait le jet était fournie par une nappe souterraine et il semble qu'elle ne contenait pas de particules solides. Toutes ces plaques en béton furent soumises à un jet dont la vitesse était constante et égale à 175 pieds par seconde (57,5 m/s). En faisant varier l'angle d'incidence du jet, on a constaté que l'usure maximum se produisait pour un jet normal à la plaque et qu'elle diminuait proportionnellement à la valeur de l'angle d'incidence. On a d'autre part remarqué que l'usure augmentait avec le temps. Ainsi une plaque soumise à un jet normal à sa surface présentait une usure maximum de 0,25 pouce au bout de deux semaines et de 1 pouce à la fin de la cinquième semaine. La surface attaquée avait la forme d'un anneau large d'environ 1 pouce dont le diamètre intérieur était environ 2 pouces [3].

Dans un article qu'il a publié en 1934, NOVERINI FALLETTI a examiné tout d'abord les usures des différentes parties d'une turbine hydraulique. Il a ensuite conseillé d'étudier le tracé des aubes, de polir les surfaces attaquées et de choisir convenablement le matériau. Selon lui, les métaux les plus durs résisteraient bien aux abrasifs tendres (schistes, argiles), les métaux les moins durs se comporteraient bien pour les abrasifs durs (sable, silice, etc...) [4].

En 1936, lors des études du barrage de Bou-Haniffa, NEYRPEC (Grenoble) fut amené à étudier l'usure des plaques en béton soumises à l'action d'une eau chargée de quartz et de calcite dont environ 4 % avait un diamètre supérieur à 0,1 mm. On cherchait la variation de la profondeur moyenne d'usure en fonction de la vitesse, de l'angle d'incidence du jet, et du temps d'exposition. Les résultats obtenus sur 39 plaques sont assez dispersés et en nombre insuffisant,

pour pouvoir constituer une étude systématique. L'installation employée pour les essais d'usure fut décrite par M. GARIEL [5].

Dans une conférence qu'il a faite en 1940, M. DE HALLER essayait d'expliquer le mécanisme de l'abrasion de la façon suivante :

Il considérait, tout d'abord, un jet de sable tel qu'on l'emploie dans le nettoyage des pièces de fonderie. Le jet d'air frappant normalement l'objet est dévié et s'écoule parallèlement à la surface attaquée. Par suite de leur force d'inertie, les grains de sable qui sont environ 2.000 fois plus denses que l'air ne peuvent pas suivre les faibles courbures des filets gazeux et viennent frapper violemment la surface de l'objet qu'ils atteignent presque perpendiculairement. Dans ce cas, l'usure serait provoquée par un martelage répété et prendrait une valeur maximum au centre du jet.

Par contre, si on expose le même objet dans un liquide, par exemple dans de l'eau, le sable, qui est tout au plus trois fois plus dense que le fluide considéré, est obligé de suivre le mouvement de l'eau et atteint la surface en un point qui est éloigné du centre du jet. Selon M. DE HALLER, la vitesse serait alors à peu près tangente à la surface et provoquerait ainsi une usure par rabotage ou limage [6].

En 1941, M. PINTO a repris, à Grenoble, l'étude des essais sur les plaques en béton. D'après un mémoire qu'il n'a d'ailleurs pas publié, il a travaillé en circuit fermé. Les éprouvettes en béton furent essayées dans les conditions suivantes :

- 1) La pression manométrique fut gardée constante et égale à 5 kg/cm², la vitesse théorique était donc de 35,5 m/s.
- 2) Le temps d'action était de 60 minutes.
- 3) L'angle d'attaque était de 90°.
- 4) L'abrasif employé était le sable de l'Isère qui passait à travers le tamis dont l'ouverture des mailles était de 0,355 mm. Le pourcentage en volume était de 8/100 (32 litres de sable pour 400 litres d'eau).

Des éprouvettes possédant la même résistance à la compression ou à la traction donnaient des résultats assez différents. Par exemple, pour trois échantillons qui remplissaient ces conditions et qui furent essayés avec une buse de 18 mm, on a trouvé des usures qui étaient respectivement de 19,4 — 6,45 et 13,1 cm³. M. PINTO a préféré alors prendre la moyenne de tous les résultats trouvés. L'usure moyenne ainsi calculée était de 22,50 cm³ pour la buse de 36 mm et de 15,85 cm³ pour la buse de 18 mm. Comme

* Se reporter à la bibliographie, à la fin de l'article

pour les essais du Bou-Hanifia, la précision des mesures était finalement insuffisante pour permettre une étude systématique.

En 1949, dans un article publié dans *la Houille Blanche*, M. A. PUYO exposait tout d'abord les facteurs intervenant dans l'usure des turbines. Il constatait qu'au bout d'un temps suffisant, le degré d'usure des turbines restait le même, quel que soit le temps de fonctionnement. Il attribue ce phénomène au fait que le matelas d'eau remplissant les parties usées protège la surface attaquée. Des essais effectués sur des turbines de 12.000 ch sous une chute

de 280 m paraissent confirmer ces résultats [7].

En 1950, dans une communication faite à la S.H.F., M. Paul BERGERON a essayé d'établir une similitude approchée de l'usure des pompes centrifuges; il s'intéressa surtout à l'usure par frottement qui cause le rebut de la roue avant l'usure par percussion [8].

Ce rappel un peu long et pourtant plus ou moins condensé des travaux antérieurs, montre la complexité des phénomènes d'usure et la difficulté de réaliser des essais systématiques, qui soient suffisamment précis pour permettre d'en dégager des lois générales.

ANALYSE DE LA RECHERCHE

L'étude expérimentale de l'usure doit déterminer l'influence de facteurs extrêmement divers. En effet l'usure semble fonction :

- 1) Des caractéristiques du matériau abrasif : dimension des grains, dureté, rugosité et densité relative par rapport au fluide.
- 2) Des caractéristiques du jet : concentration en mixture, vitesse de l'écoulement, angle d'incidence et diamètre du jet.
- 3) Des caractéristiques du matériau attaqué : texture, rugosité, dimension de la sur-

face, élasticité, charge de rupture et dureté.

4) Du temps d'exposition.

Dans l'étude que nous allons exposer, nous considérons le cas particulier d'une éprouvette en métal, rectifiée par une machine polisseuse du type BLANCHARD et exposée à un jet de mixture. Des essais systématiques ont été effectués pour essayer de faire apparaître l'influence des principaux facteurs. Nous n'avons pu malheureusement étudier, même partiellement, qu'un nombre limité des facteurs énumérés ci-dessus.

DESCRIPTION DE L'INSTALLATION D'USURE UTILISÉE APPAREILS ET MÉTHODES DE MESURES

Le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique a repris, en 1948, l'étude du problème d'usure par abrasion pour le transport des schlams du pipeline de Carling. On s'est alors efforcé de perfectionner l'appareil utilisé en 1941 par M. PINO, appareil qui était lui-même une réplique de celui utilisé à Bou-Hanifia en 1936.

Dans cet appareil (fig. 1), le jet sortant d'une buse vient frapper une plaque d'essai. La mixture est recueillie dans un tuyau (c) où elle est reprise par une pompe à déblai BERGERON du type RL-32. L'appareil fonctionne ainsi en circuit fermé.

Nous avons perfectionné l'appareil en lui ajoutant une goulotte de prélèvement qui se déplace sur le même chariot que l'éprouvette d'essai. Après un premier brassage de la mixture par la pompe, un déplacement du chariot permet de

présenter la plaque sous le jet pour la durée de l'essai. Un second déplacement du chariot permet ensuite d'effectuer le prélèvement donnant la concentration de transport. Cette concentration de transport est en général très différente de la concentration moyenne existant dans l'ensemble de l'installation à cause d'un effet de stockage, dans le caisson et les tuyauteries, variable avec le débit et les vitesses de chute des grains [9].

Mesure de la concentration de transport

Le prélèvement se fait à l'aide de la goulotte. Le volume de mixture est déterminé à 1/100 près dans une capacité jaugée. Le sable abrasif recueilli dans un sac de toile est séché à l'étuve.

L'erreur sur la concentration de transport ainsi mesurée semble inférieure à 2/100.

Mesure de la vitesse du jet

On détermine la vitesse du jet en mesurant la pression statique dans la conduite en un point situé à 73 cm de la sortie de la buse. Au cours de nos essais, nous avons utilisé deux modèles de buses dont les diamètres de sortie sont res-

pectivement de 10 et 20 mm. Leur coefficient de débit mesuré en eau claire est voisin de 0,95.

Si l'on suppose, en première approximation, que l'usure varie avec le cube de la vitesse, on voit que la vitesse doit être connue avec précision. C'est pourquoi nous avons effectué les mesures en remplaçant les manomètres métalliques par une presse à étalonner donnant la valeur d'une pression stable à 1/1.000 près. Avant d'effectuer les mesures, on évitait l'obstruction

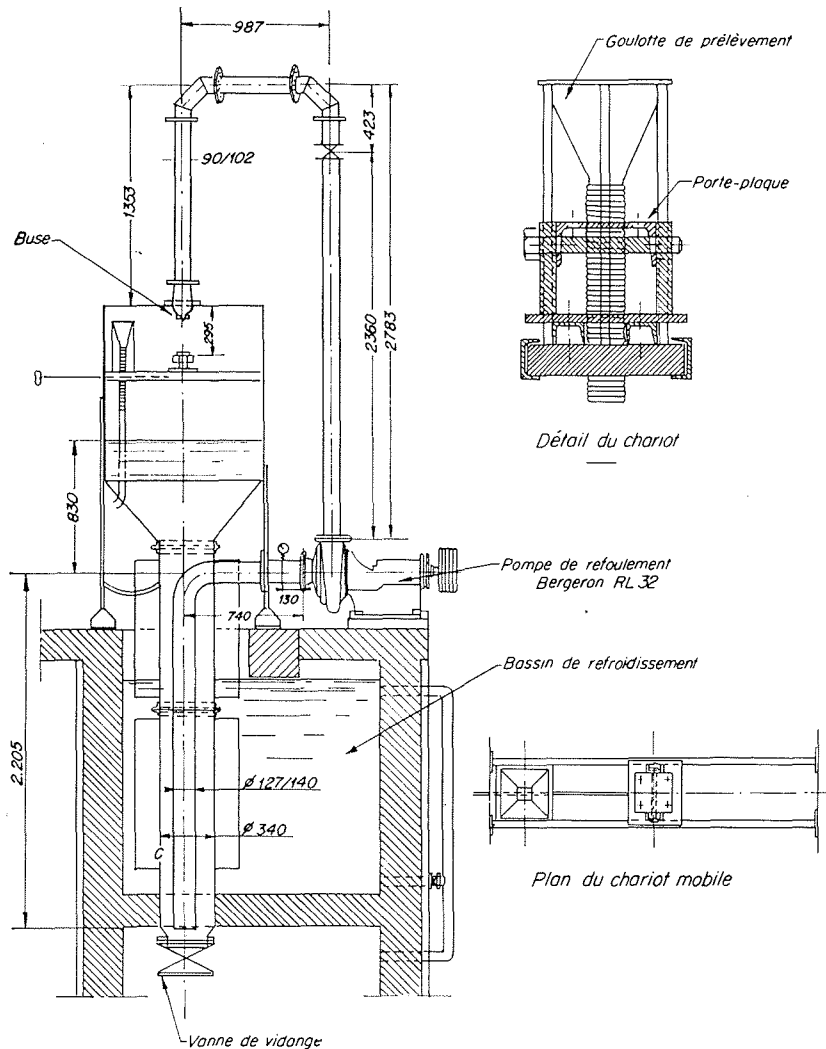


FIG. 1. — SCHÉMA DE L'INSTALLATION D'USURE.

éventuelle de la prise de pression par un lavage à l'eau sous pression. Malgré les fluctuations de la pression de refoulement, l'erreur sur cette mesure semble inférieure au 1/100.

En exprimant cette pression en hauteur de mixture et en appliquant le théorème de BERNOULLI entre la section de mesure et la sortie de la buse, on a la vitesse du jet.

Dans les calculs que nous avons faits, nous n'avons pas tenu compte de la vitesse dans la conduite de refoulement, l'erreur ainsi introduite étant négligeable. On a, d'autre part, supposé que le coefficient de débit conservait sa valeur initiale, égale à 0,95 en eau claire, lorsqu'on augmentait la concentration de transport de la mixture.

Mesure du temps

La durée de l'exposition de l'échantillon au jet de mixture est mesurée avec un chronomètre donnant le 1/10 de seconde. La durée des essais systématiques effectués étant généralement supérieure à 5 minutes, l'erreur absolue que l'on commet est certainement inférieure à 1/1.000.

Mesure de l'usure

Pour déterminer l'usure d'une plaque, on peut opérer comme M. PINTO en relevant les profils et en calculant le volume usé. Nous avons préféré mesurer la perte de poids avant et après chaque essai, à l'aide d'une balance de précision. L'erreur de mesure est inférieure à 3/1.000.

CHOIX ET CARACTÉRISTIQUES DE L'ABRASIF EMPLOYÉ

Dans un appareil à circuit fermé, le sable s'use rapidement. C'est pourquoi nous avons cherché un abrasif que l'on puisse se procurer en grande quantité et qui s'use le moins possible. Nous avons employé le sable d'Hostun (Drôme) à 97 % de silice libre de densité 2,7. Afin de garder constantes autant que possible les caractéristiques de l'abrasif, un stock important de sable avait été constitué.

L'analyse granulométrique du sable neuf et du sable usé, montre que le diamètre moyen passe de 0,70 mm à 0,56 mm à la fin de 6 minutes d'essais à la concentration de 30 g par litre. Ceci indique qu'il est nécessaire de faire des essais de courte durée et de changer le sable en fin de chaque essai.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DES ESSAIS

Influence des dimensions de la plaque

En examinant une plaque exposée à un jet de mixture et dont les dimensions sont au moins le triple du diamètre du jet, on constate que les parties éloignées du centre du jet ne sont presque pas usées.

Les essais sur des plaques en acier doux ont donné :

- 1) En incidence normale (90°) : L'usure a augmenté de 5 % en passant d'une éprouvette de 11×11 cm à une éprouvette de $17,6 \times 17,6$ cm.

- 2) Pour un angle d'incidence de 60° : L'usure a diminué de 3 % lorsque la surface de l'éprouvette a passé de 220 cm² à 382 cm².

- 3) Pour un angle d'incidence de 45° l'usure a diminué de 0,6 % pour la même variation de 220 cm² à 382 cm².

Il s'avère que ces écarts sont de l'ordre de grandeur de la précision des mesures. Nous avons donc conclu que l'augmentation de la surface à partir d'une certaine limite n'a pas d'influence sensible, dans le cadre de nos essais. Tous les essais systématiques ont été effectués sur des plaques carrées de 11 cm de côté.

USURE DE L'ÉPROUVETTE ET DU SABLE EN FONCTION DU TEMPS

Si l'on soumet une même éprouvette à une série d'essais d'usure effectués dans des conditions identiques en renouvelant le sable chaque fois, les points d'essais s'alignent sur la droite A (fig. 2). Ceci prouve que les modifications de

forme de l'éprouvette au cours de son usure n'ont pas d'influence appréciable sur cette dernière. En soumettant des éprouvettes semblables à un jet identique, mais pendant des durées différentes, et ceci sans renouvellement du sable

au cours de chaque essai, on obtient la courbe B de la figure 2. Cette courbe met en évidence l'usure du matériau dans notre appareil en circuit fermé.

Pour une concentration de 150 g/litre, l'usure

de l'éprouvette se trouve diminuée de 17 % au bout de 20 minutes d'essais. Au contraire, avec une concentration de transport de 350 g/litre, l'usure diminue de 4 % au bout de 20 minutes.

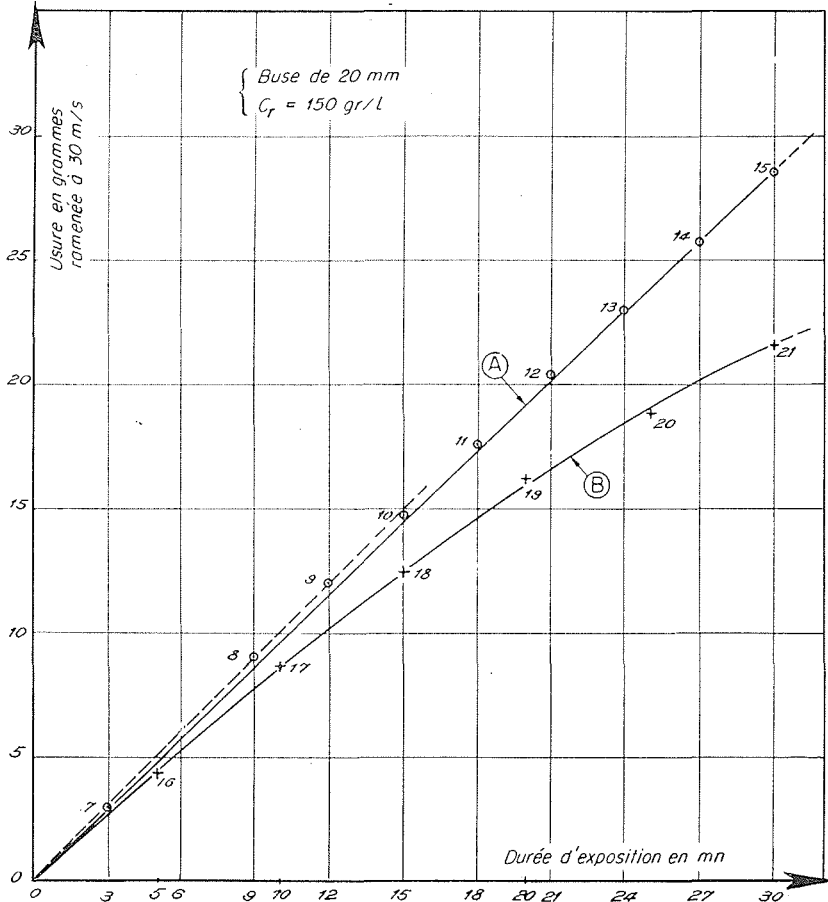


FIG. 2. — VARIATION DE LA VITESSE D'USURE EN FONCTION DU TEMPS.

- Points expérimentaux obtenus avec une même plaque et en renouvelant le sable toutes les 3 minutes.
- + Points expérimentaux obtenus avec les différentes plaques sans renouvellement de sable.

INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE TRANSPORT ET DE LA VITESSE DU JET SUR L'USURE

La détermination de l'influence de la concentration de transport sur l'usure présente de grandes difficultés. En effet, au cours de ces essais, il était difficile de maintenir rigoureusement constante la pression en hauteur de mixture fournie par la pompe. Ces variations proviennent, soit de l'usure de la pompe, soit de variations de la tension du réseau électrique. Mais, même en négligeant ces variations, la puissance demandée au moteur augmentant avec la concentration, sa vitesse de rotation et la hauteur engendrée diminuent. Par suite, la

vitesse dans la buse varie d'une façon continue avec la concentration et, d'un essai à l'autre, les trois variables : usure, concentration, vitesse, varient simultanément.

On peut évidemment écrire simplement que :

$$U = f(C_r, V_0) \tag{1}$$

est de la forme :

$$U = k \cdot C_r^n \cdot V_0^m \tag{2}$$

où U est la vitesse d'usure en grammes par seconde ou en centimètres cube par seconde.

C_T est la concentration de transport,

V_0 est la vitesse de la mixture à travers la section contractée.

Nous avons alors deux exposants à déterminer. Mais en reprenant le raisonnement de M. P. BERGERON, et en supposant que, dans notre cas, l'usure est proportionnelle à la variation de l'énergie cinétique des grains, nous obtenons l'équation* :

$$U = k \Sigma m (V_1^2 - V_2^2) = k (C_T S V_0)^n (V_1^2 - V_2^2) \quad (3)$$

* En s'inspirant d'une idée de M. P. BERGERON, nous avons également essayé de construire un appareil d'érosion constitué par une pale mobile autour d'un axe horizontal et placé dans un cylindre en dural fermé à ses deux extrémités. Les quelques essais que nous avons réalisés sur cet appareil nous ont permis de nous rendre compte de la valeur de l'usure par frottement et de

Σm = masse totale des grains qui viennent heurter la plaque.

S = section du jet

V_1 = vitesse du grain avant le choc,

V_2 = vitesse du grain après le choc,

Admettons, par ailleurs, que les rapports V_1/V_0 et V_2/V_0 soient constants quelle que soit la valeur de V_0 ; nous arrivons à l'équation :

$$U = k \cdot S^n \cdot C_T^n \cdot V_0^{2+n} \quad (4)$$

En exprimant la loi $U = f(C_T, V_0)$ sous cette forme, nous voyons que nous n'avons qu'un seul exposant à déterminer, l'exposant m de la vitesse étant égal à $(2 + n)$.

conclure que, dans le problème d'usure considéré, l'usure par frottement est négligeable par rapport à l'usure par choc, conformément à l'hypothèse que nous venons de faire.

M. BERGERON a d'ailleurs présenté à ce sujet une très intéressante communication lors des Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France (juin 1952 à Grenoble).

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

Nous avons porté les variations de l'usure en fonction de la concentration de transport en coordonnées logarithmiques et nous avons tracé les

droites reliant les points à vitesse constante (fig. 3 a, 3 b).

$$\log U = n \log C_T + \text{constante}$$

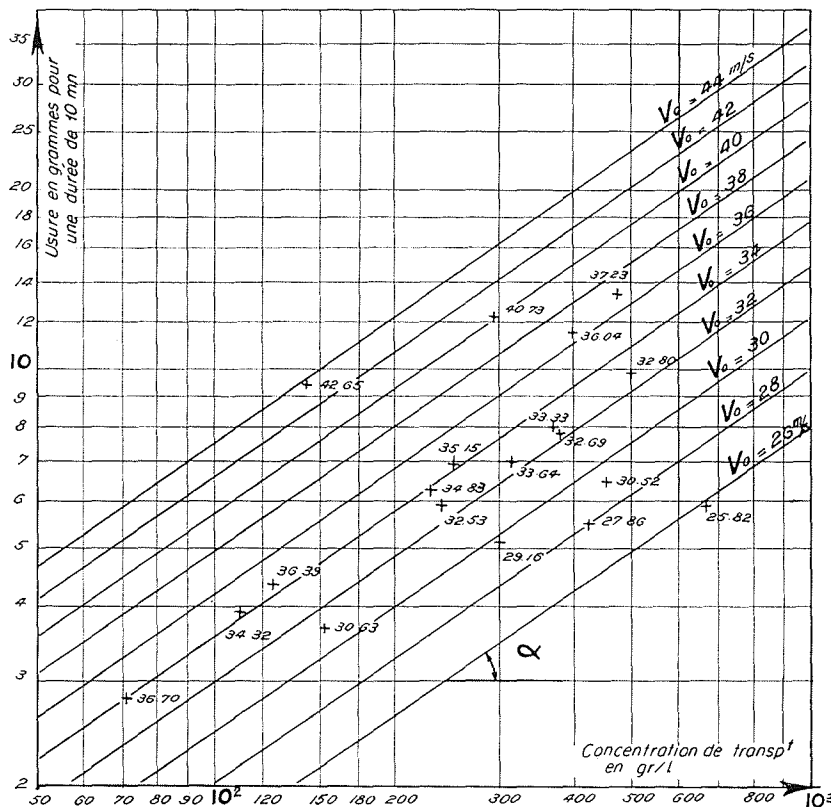


Fig. 3 a. — COURBES D'USURE A VITESSE CONSTANTE.
Buse de 10 mm — $\text{tg } \alpha = 0,7$

La valeur de n ainsi obtenue est comprise entre 0,70 et 0,75. Nous avons préféré adopter la valeur 0,70 car, pour les faibles concentrations, l'usure du sable est plus rapide et il est normal que l'on trouve alors des valeurs de l'usure un peu faibles.

Si nous portons également en coordonnées logarithmiques l'usure en fonction de la vitesse

(fig. 4 a, 4 b), les droites à concentration de transport constante correspondent à l'équation :

$$\log U = m \log V_0 + \text{constante.}$$

La valeur de m ainsi déterminée est comprise entre 2,7 et 3.

La précision de nos mesures et la gamme de

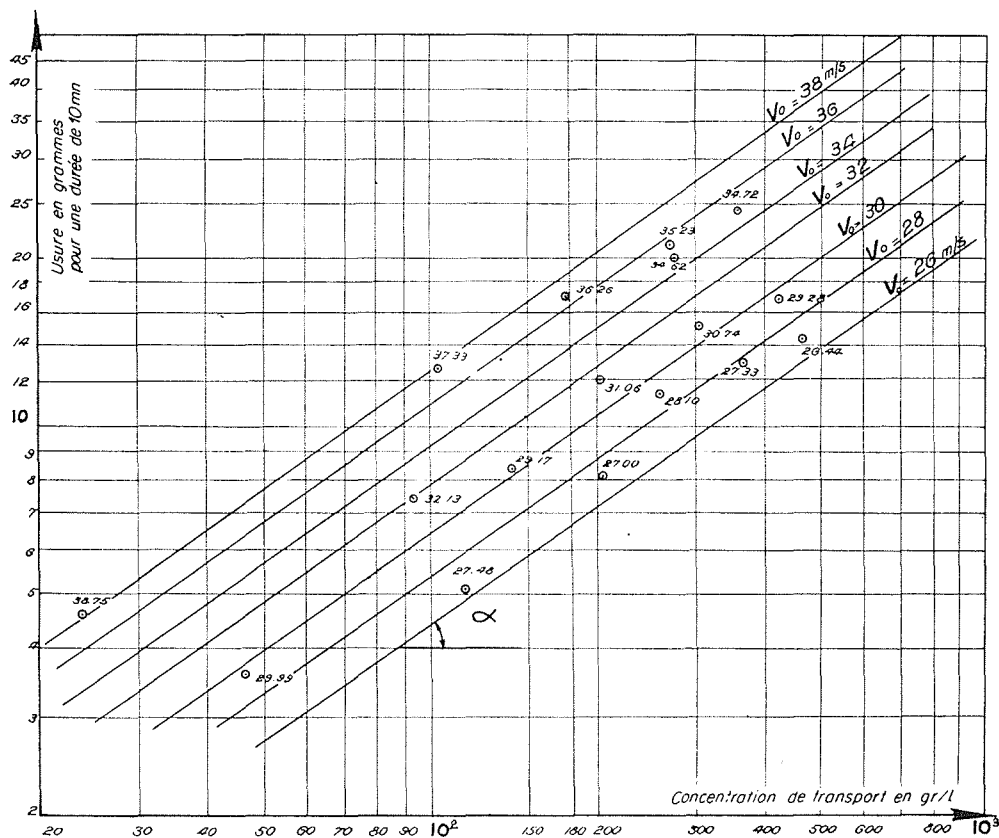


Fig. 3 b. — COURBES D'USURE A VITESSE CONSTANTE.
Buse de 20 mm — $\text{tg } \alpha = 0,7$

vitesse réalisées ne nous permettent pas, quel que soit le mode de dépouillement des essais, d'affirmer si la vitesse varie avec l'exposant 2,7 ou avec l'exposant 3.

Mais nous pouvons remarquer que si l'équation (4) est vérifiée, les usures observables pour une même concentration et une même vitesse, avec des buses de section S_1 et S_2 seront, pour $n = 0,7$, dans le rapport.

$$\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0,7}$$

Ce rapport est bien vérifié par nos essais avec les buses de 20 et 10 mm de diamètre.

Ainsi, quoique les mesures ne permettent pas de préciser si l'exposant de la vitesse a pour

valeur 2,7 ou 3, il est nettement vérifié que l'influence du diamètre du jet est conforme à l'équation (4).

Il semble donc logique de supposer que l'équation (4) est valable également pour la vitesse; nous admettrons donc finalement que la relation entre l'usure, la section du jet, la vitesse et la concentration est :

$$U = k \cdot S^{0,7} \cdot C_T^{0,7} \cdot V_0^{2,7}$$

Nous avons essayé d'effectuer des essais avec une buse en carborendum de 6 mm de diamètre. Les résultats étaient très dispersés. En particulier, les mesures de prélèvement n'étaient plus fidèles, ce qui doit être imputé à l'existence de dunes de sable dans les parties horizontales de l'installation.

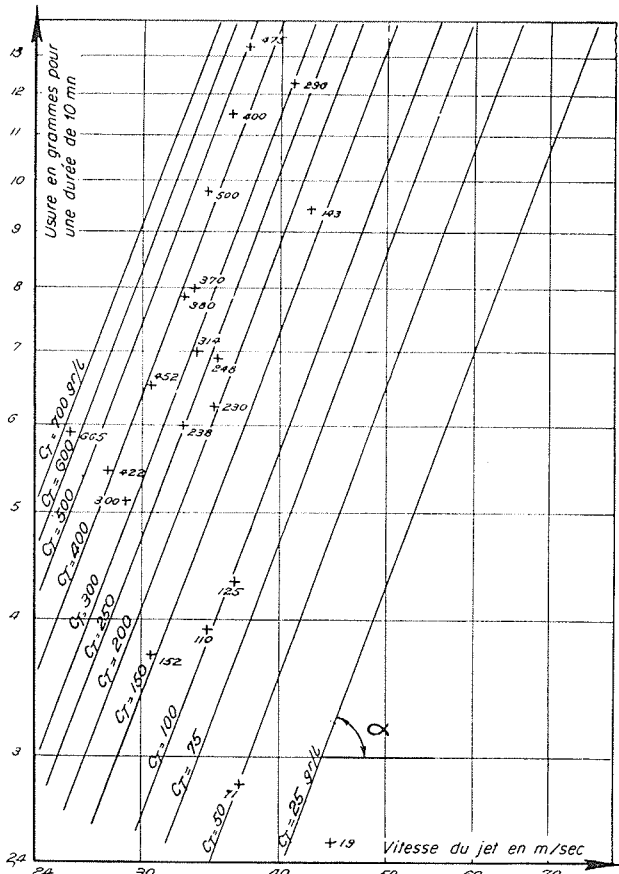


FIG. 4 a. — COURBES A CONCENTRATION DE TRANSPORT CONSTATE.
Buse de 10 mm — $\text{tg } \alpha = 2,7$

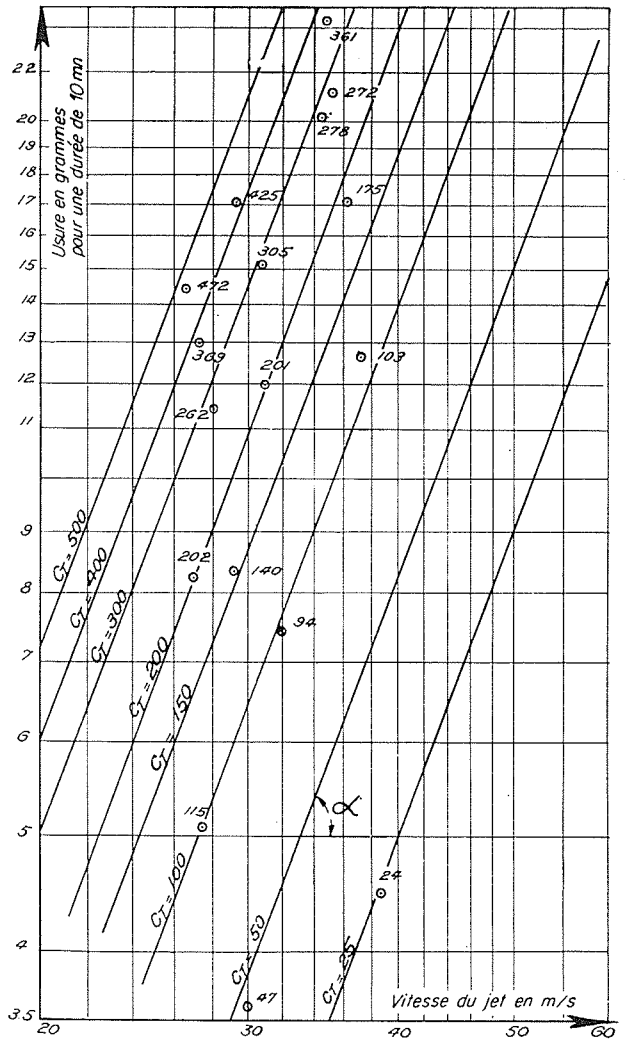


FIG. 4 b. — COURBES A CONCENTRATION DE TRANSPORT CONSTATE.
Buse de 20 mm — $\text{tg } \alpha = 2,7$

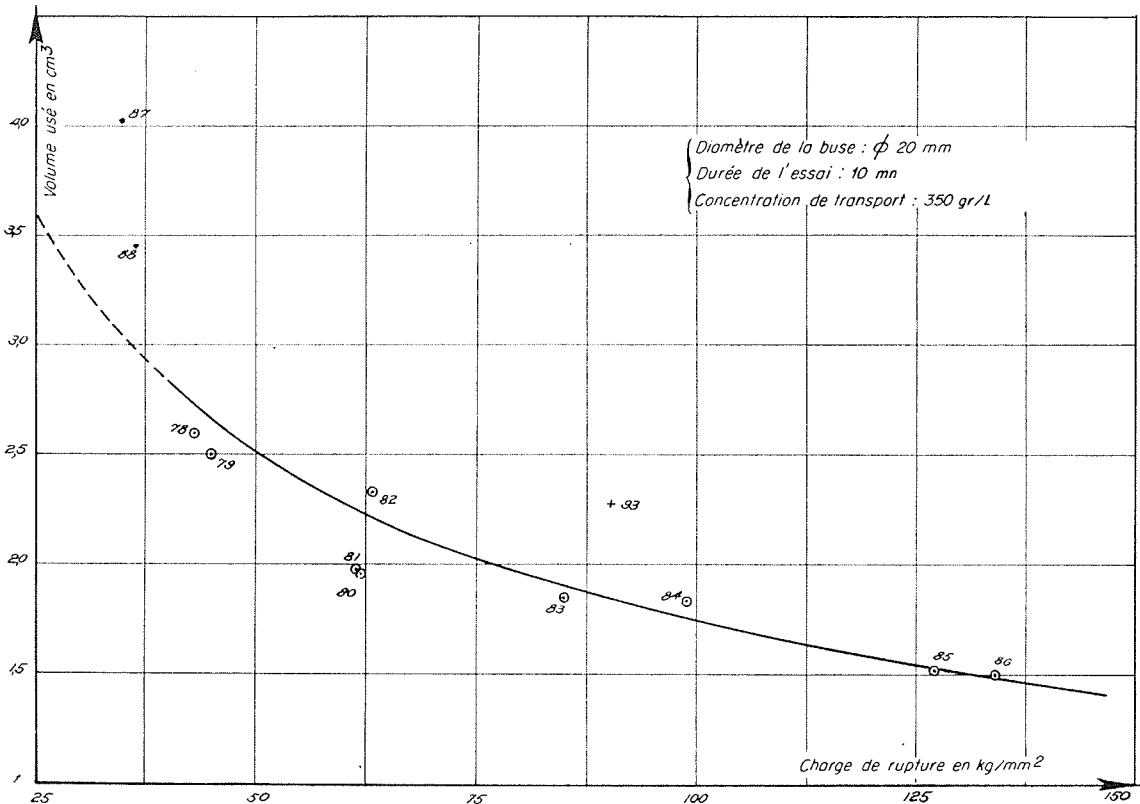


FIG. 5. — INFLUENCE DE LA CHARGE DE RUPTURE SUR L'USURE, déterminée d'après la dureté Brinell ou Rockwell.

INFLUENCE DE LA CHARGE DE RUPTURE

Dans l'analyse de notre étude, nous avons déjà signalé les divers facteurs caractéristiques de l'éprouvette qui peuvent intervenir dans les usures. Parmi les facteurs mentionnés, la dureté est la plus facile à déterminer. D'ailleurs, l'essai de BRINELL qui fait intervenir un effort de compression à une certaine analogie avec le mécanisme d'usure par choc normal à la plaque.

Nous avons réalisé une série d'essais sur des aciers de dureté différente (voir fig. 5). Comme pour les grandes valeurs de la charge de rupture, il a fallu employer la dureté ROCKWELL, nous avons porté l'usure en cm^3 de la cavité usée en fonction de la charge de rupture R en kg/mm^2 .

$$U = \frac{17,6}{\sqrt{R}}$$

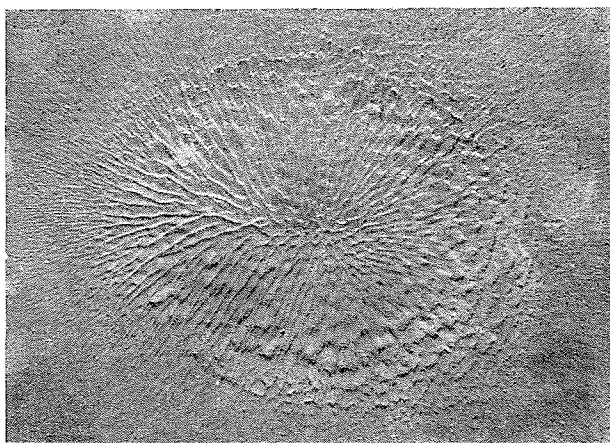
Il faut remarquer que la précision de cette série d'essais laisse à désirer, car pour certains d'entre eux, les pressions ont été mesurées avec des manomètres métalliques de précision médiocre. D'autre part, quoique la quantité de sable introduite dans l'installation soit demeurée constante d'un essai à l'autre, il n'a pas été effectué de prélèvement de contrôle.

Ce résultat n'est valable que pour les aciers; il faut chercher une autre loi pour la fonte et les métaux non ferreux. Il semble que l'usure est d'autant plus forte que la texture métallo-

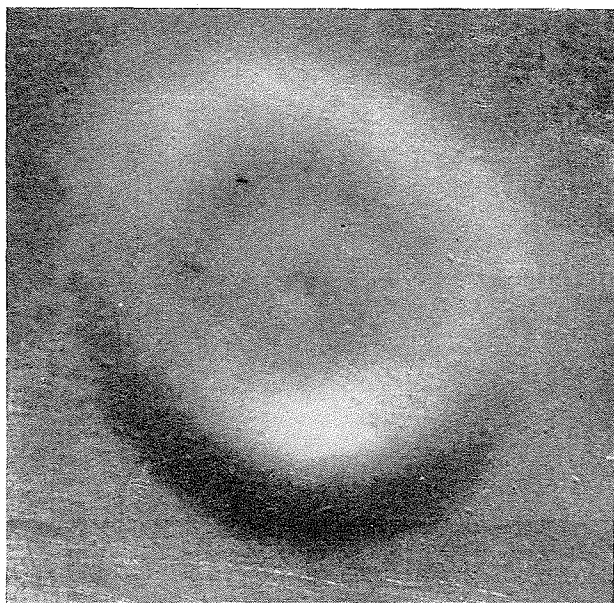
graphique est plus grossière. D'autre part, la très bonne tenue des plaques revêtues d'une couche de néoprène ou de caoutchouc nous a montré l'importance des qualités élastiques des matériaux (fig. 6).

INFLUENCE DE LA GRANULOMÉTRIE

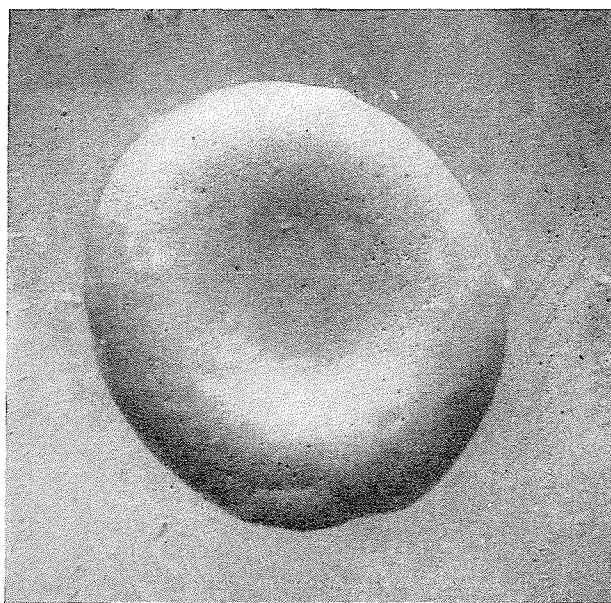
Pour nous rendre compte de l'influence de la granulométrie du sable introduit dans l'installation d'usure, nous avons considéré deux autres catégories de sable siliceux, provenant de Barbières (Drôme) et désignées par le fournisseur par ID et IID.



Usure du caoutchouc.



Usure du duralumin : le centre de la cavité est creusé à la même profondeur que la partie annulaire.



Usure du laiton : les bords de la cavité, de forme annulaire, sont nettement dessinés.

La comparaison des résultats obtenus avec les sables de Barbières et d'Hostun (fig. 7) permet les conclusions suivantes :

1) Le passage du sable d'Hostun au sable de Barbières ID, dont le diamètre le plus

fréquent est de 0,21 mm (soit 3,3 fois plus petit) entraîne une diminution de l'usure de 7 % environ.

2) Le passage du sable d'Hostun au sable de Barbières IID, dont le diamètre le plus fréquent est de 0,076 mm (soit 9 fois plus

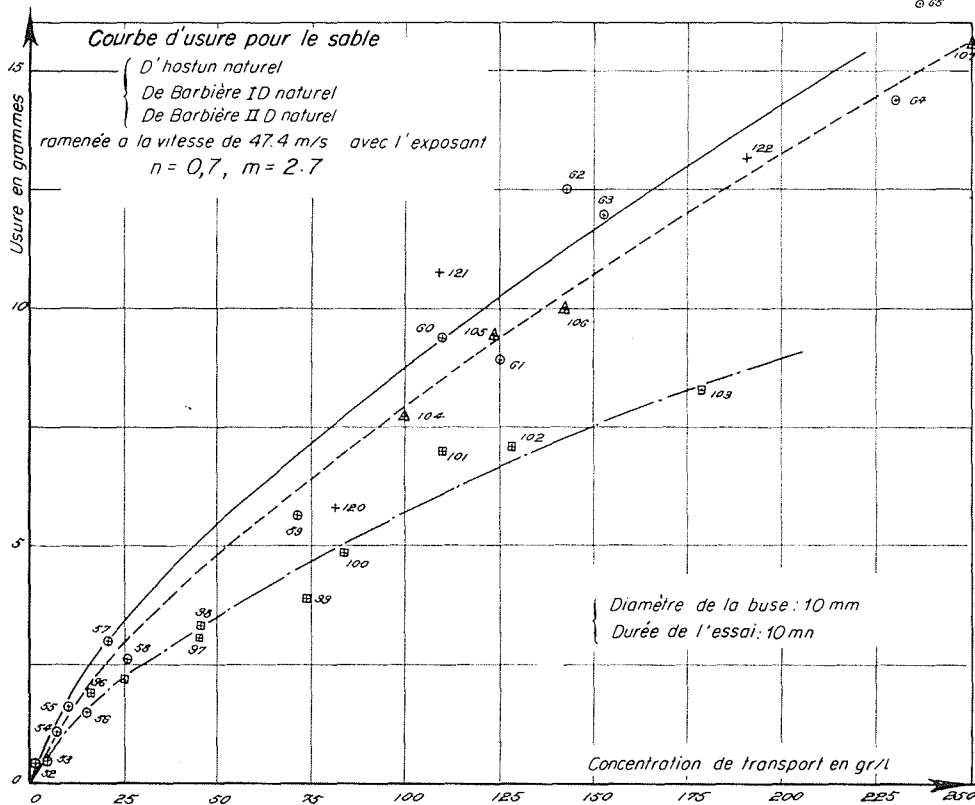


FIG. 7.

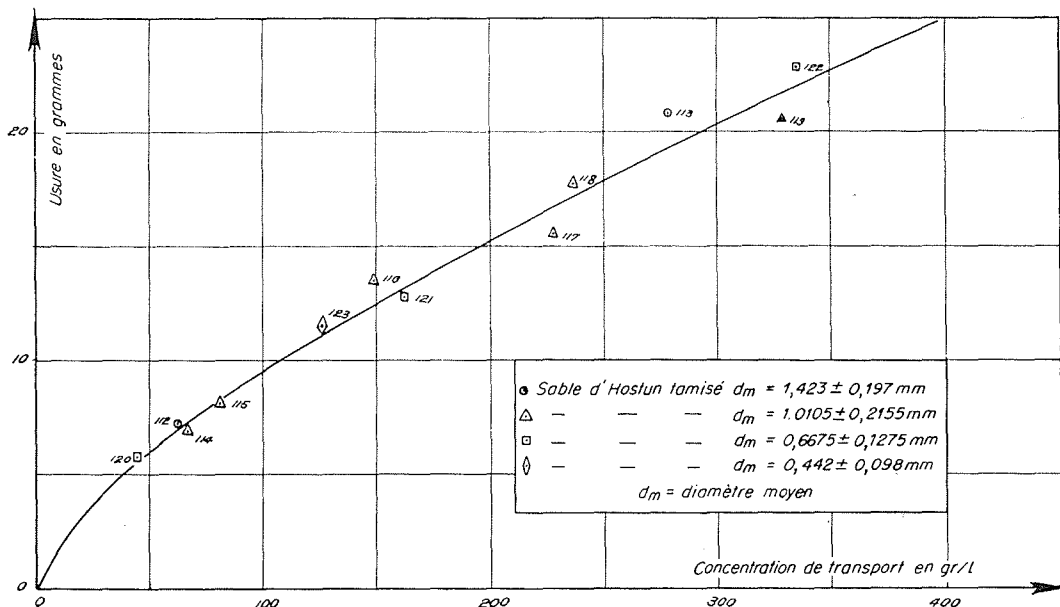


FIG. 8. — COURBE D'USURE POUR LE SABLE D'HOSTUN TAMISÉ, ramenée à la vitesse de 47,4 m/s avec l'exposant $n = 0,7, m = 2,7$.
 Diamètre de la buse : 10 mm. Durée de l'essai : 10 mn.

petit) entraîne une diminution de l'usure de 37 % environ.

La forte diminution du pouvoir abrasif obtenu dans ce dernier cas semble provenir du pourcentage élevé des grains fins contenus dans l'abrasif employé.

Nous avons ensuite tamisé le sable d'Hostun et considéré quatre bandes différentes de diamètre moyen 1,4 — 1 — 0,66 et 0,44 mm (fig. 8). La précision de nos mesures ne nous permet pas de déceler une variation de l'usure avec la taille des grains.

Par contre, on constate que les usures sont légèrement supérieures à celles que l'on obtenait avec le sable d'Hostun non tamisé. La pré-

sence de grains fins dans le sable naturel semble donc diminuer le pouvoir abrasif du matériau considéré. Pratiquement, on peut dire que, dans notre cas, l'usure est indépendante de la dimension des grains, tant que leur diamètre est supérieur à 0,2 mm environ. Elle semble décroître ensuite lentement avec le diamètre des grains.

La décroissance de la vitesse d'usure en fonction du temps, due à l'usure des matériaux abrasifs, semble donc être indépendante des variations de la taille des grains pour les sables grossiers, et ne doit dépendre que de leur rugosité. L'examen microscopique du sable neuf et usé montre que les angles vifs s'émoussent rapidement au cours des essais.

ESSAIS SUR PLAQUES INCLINÉES

L'étude de l'influence de l'angle d'attaque du jet présente de grandes difficultés : l'usure est produite à la fois par choc et par frottement et, de plus, les grains abrasifs n'attaquent pas tous la plaque avec le même angle.

Les quelques essais que nous avons effec-

tués avaient pour but de nous donner une idée de l'influence de l'angle d'incidence du jet sur l'usure et ne constituent pas une étude systématique du problème.

Le contour de l'usure qui est circulaire pour un jet normal, prend une forme ovoïde de plus

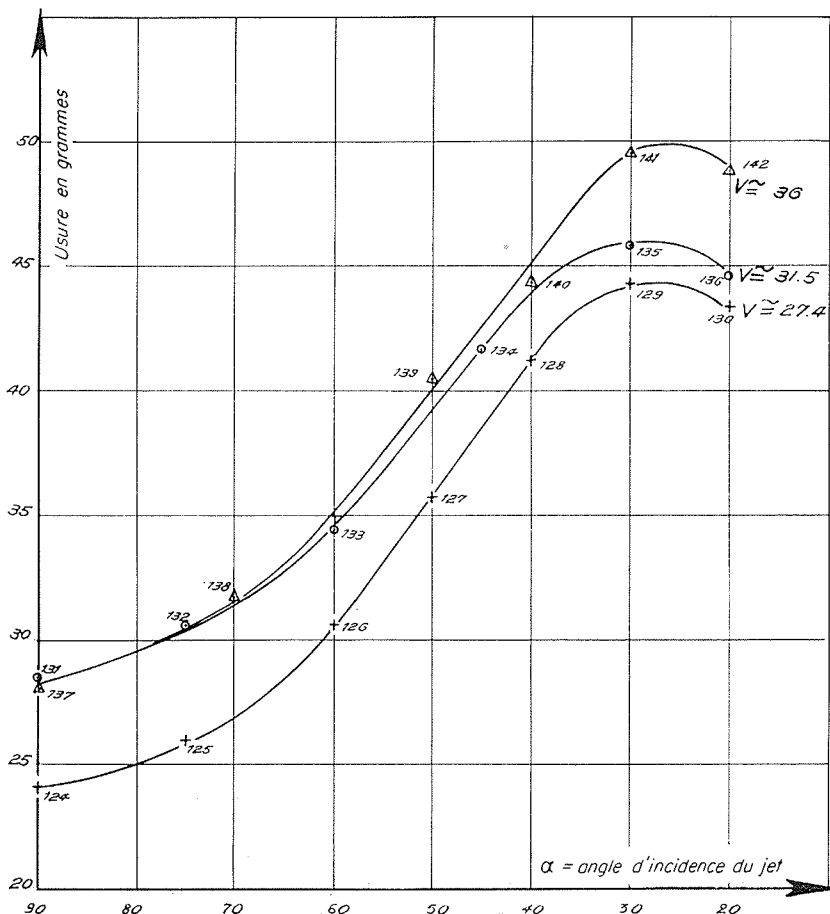


FIG. 9. — VARIATION DE L'USURE EN FONCTION DE L'INCLINAISON DE LA PLAQUE, Usure ramenée à la vitesse de 47,4 m/s avec l'exposant $n = 0,7$, $m = 2,7$.

en plus allongée quand l'angle d'incidence diminue.

Les essais montrent que l'usure passe par un maximum pour un angle d'incidence de 30° puis diminue rapidement de 30° à 0° .

Nous avons constaté que cette propriété se conservait pour les trois séries d'essais que nous avons réalisées (fig. 9).

En première approximation, on peut dire que

CONCLUSION

Les quelques résultats obtenus sur notre installation présentent un certain intérêt, étant donné qu'il s'agit des premiers essais systématiques publiés à ce jour.

Nous avons pu, avec une précision généralement satisfaisante, mettre en évidence, dans notre cas particulier, l'influence sur l'usure des facteurs vitesse, concentration, diamètre du jet et, dans une certaine mesure, granulométrie du sable abrasif.

Les résultats obtenus, en ce qui concerne la tenue à l'usure comparée des aciers et l'influence de la granulométrie des sables, semblent contraires à l'expérience acquise avec les machines

industrielles. Ceci montre, croyons-nous, l'extrême complexité des phénomènes d'usure par les eaux chargées. L'attaque par un jet en incidence normale ne constitue qu'un cas particulier qui intéresse principalement les bords d'attaque des pales ou aubages des machines tournantes. Les usures par frottement doivent vraisemblablement suivre des lois différentes. En outre, la conception de notre installation en circuit fermé constitue une complication pour la conduite des essais et le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique a construit, à la suite de notre recherche, un appareil fonctionnant en circuit ouvert, dont les résultats d'essais seront sans doute publiés ultérieurement.

$$U = \frac{U_0}{\sin \alpha} \text{ pour } 90^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$$

U_0 est l'usure d'une éprouvette normale au jet essayée dans des conditions identiques.

α est l'angle d'incidence du jet.

Bibliographie

1. — M. GARY : Wearing Qualities of Materials Tested by means of Sandblast. — Mitteilungen aus dem königlichen Materialprüfungsamt. Berlin, 1904, page 103.
Résumé dans « Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers », page 442.
2. — A. HANISCH : Prüfungsergebnisse mit Natürlichen Bausteinen.
Wien und Leipzig, 1912.
3. — a) W. STEELE, A. RUETTGERS : Test of concret Blocks subjected to High Waterjet Velocities.
Bureau of Reclamation, 1931.
b) W. STEELE, A. RUETTGERS : Model Studies of Spillways. Bureau of Reclamation, Part VI.
Bulletin 1, pages 163-182.
c) A. ABRAMS : Transaction of the American Society of Civil Engineers, 1947, pages 111-112.
4. — N. FALLETTI : L'erosione e la corrosione delle turbine idrauliche.
Energia Elettrica, avril 1934, pages 277-287.
5. — M. GABRIEL : Roue des turbines hydrauliques et des pompes à eau. Quelques considérations sur les qualités auxquelles doivent répondre les métaux qui les constituent.
Revue de l'Aluminium et de ses applications, 1938, pages 1568-1570.
6. — P. DE HALLER : Erosion et cavitation.
Bulletin technique de la Suisse romande, 28 décembre 1940, pages 289-293.
7. — A. PUYO : Francis ou Pelton.
La Houille Blanche, 1949, pages 479-496.
8. — P. BERGERON : Similitude des usures causées par des mixtures liquides-solides (application aux roues de pompes centrifuges).
La Houille Blanche, n° spécial B-1950, pages 716-729.
9. — P. DANIEL : Chariage en suspension.
AIRTH, 1948, n° 30, 2° réunion.

L'auteur a voulu, dans ce travail, apporter sa modeste contribution à l'étude du problème complexe de l'usure des machines hydrauliques par les eaux chargées de matériaux solides en suspension. Cette thèse est essentiellement expérimentale et a nécessité l'utilisation d'un matériel relativement important.

Aussi, tenons-nous à remercier très sincèrement MM. GABRIEL, Président-Directeur Général aux Etablissements NEYRPEC, et P. DANIEL, Directeur du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, d'avoir bien voulu nous confier la conduite de ces essais et d'avoir mis à notre disposition l'équipement dont nous avons besoin.

Qu'il nous soit permis également de remercier les Ingénieurs et l'ensemble du personnel qui nous ont aidé dans cette étude. Nous nous devons d'ailleurs de rendre hommage à l'esprit d'équipe et d'amitié qui règne dans le Laboratoire, et dont nous garderons le souvenir le plus vivace.

L'auteur remercie enfin le Conseil des Professeurs de l'Université d'Istanbul de lui avoir accordé les moyens d'effectuer ce travail en France.