

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 - https://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 REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Auteur(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Bulletin du Laboratoire d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines du Conservatoire National des Arts et Métiers
Adresse	Paris : Librairie Polytechnique Ch. Béranger, éditeur, 1903-1931
Nombre de volumes	23
Cote	CNAM-BIB P 1329-A
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039047083
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-A
LISTE DES VOLUMES	
	N° 1 - Tome I (1903-1904)
	N° 2 - Tome I (1903-1904)
	N° 3 - Tome I (1903-1904)
	N° 4 - Tome I (1903-1904)
	N° 5 - Tome I (1903-1904)
	N° 6 - Tome I (1905-1906)
	N° 7 - Tome I (1905-1906)
	N° 8 (1906)
	N° 9 (1906)
	N° 10 (1907)
	N° 11 (1907)
	N° 12 (1907)
	N°13 (1908)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	N°14 (1908)
	N°15 (1908)
	N°16 (1911)
	N°17 (1917)
	N°18 (1919)
	N°19 (1919)
	N° 20 (1922)
	N° 21 (1924)
	N°22 (1927)
	N°23 (1931)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Bulletin du Laboratoire d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines du Conservatoire National des Arts et Métiers
Volume	<u>N°14 (1908)</u>
Adresse	Paris : Librairie Polytechnique Ch. Béranger, éditeur, 1908
Collation	1 vol. (17 p.) : figure, planche ; 25 cm
Nombre de vues	26
Cote	CNAM-BIB P 1329-A (14)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	10/04/2025
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039047083
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-A.14

81329-A

8° Ku 107 (110)

BULLETIN
DU
LABORATOIRE D'ESSAIS
MÉCANIQUES, PHYSIQUES, CHIMIQUES ET DE MACHINES
DU
CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

N° 14

ESSAIS DE TORSION

Les essais de torsion considérés comme moyens
de sélection des métaux
Relations entre la torsion et la traction

PAR

Pierre BREUIL

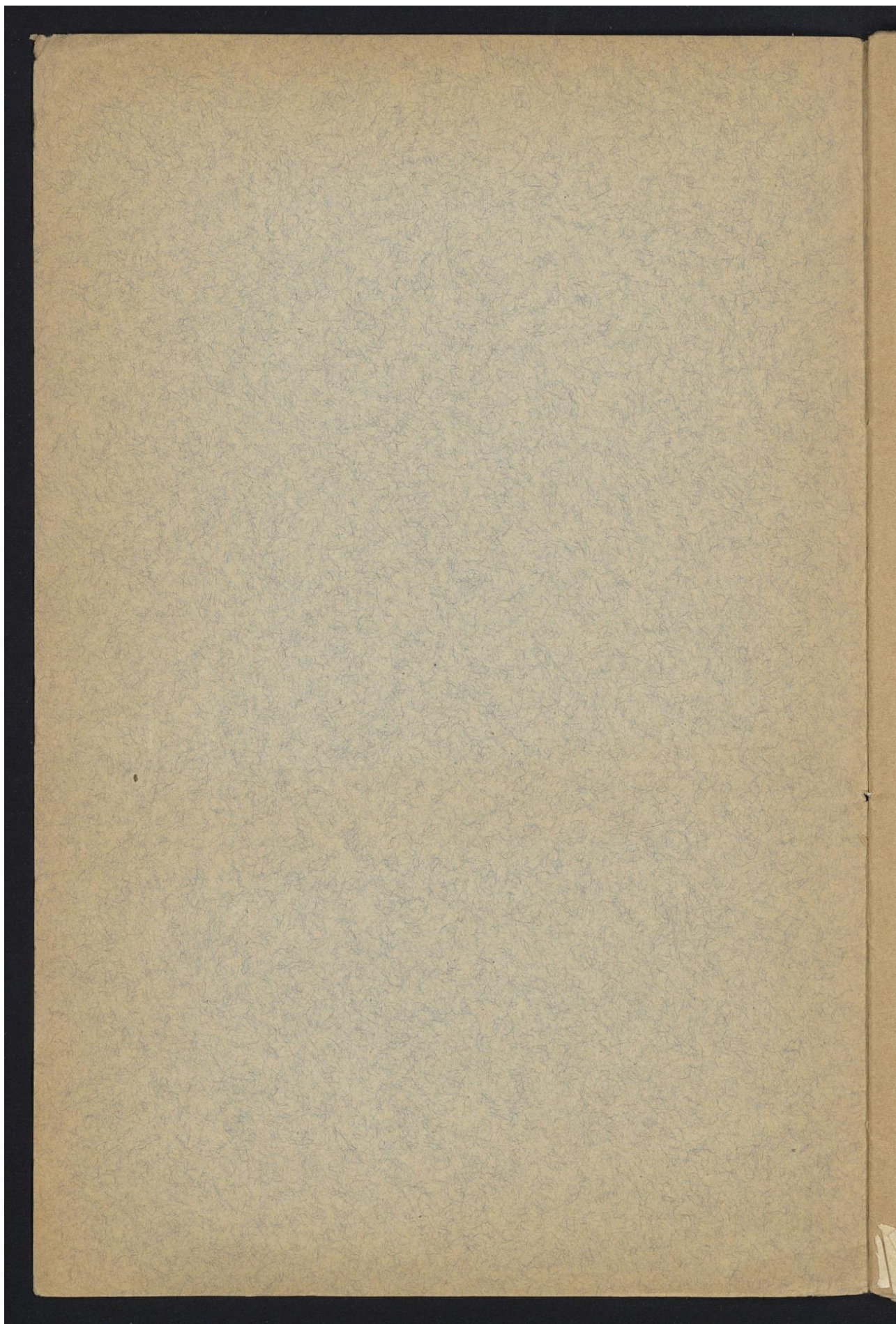
Chef de la Section des Métaux du Laboratoire d'Essais.

Avec 1 planche

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER, ÉDITEUR
Successeur de BAUDRY & C^{ie}
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MÊME MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1908

Tous droits réservés



80 Km lot (110)

ESSAIS DE TORSION

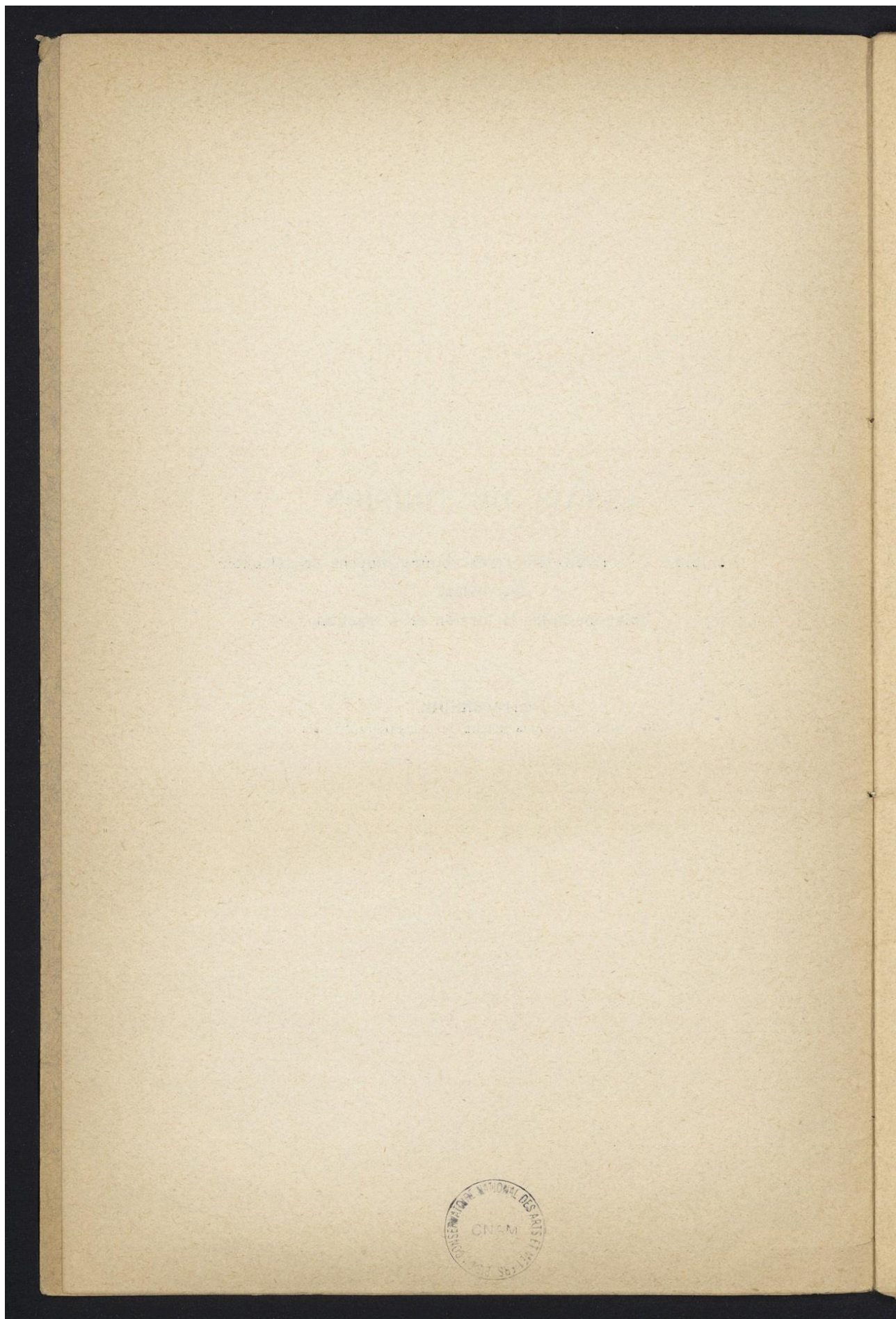
Les essais de torsion considérés comme moyens de sélection
des métaux

Relations entre la torsion et la traction

PAR

Pierre BREUIL

Chef de la Section des Métaux du Laboratoire d'Essais



ESSAIS DE TORSION

Les essais de torsion considérés comme moyens de sélection
des métaux

Relations entre la torsion et la traction

PAR

Pierre BREUIL

Chef de la Section des Métaux du Laboratoire d'Essais

Au cours d'une étude sur les essais de torsion, nous avons été amené à dire (page 570 de la *Revue de Mécanique*, 1907) que ces essais seraient très intéressants pour l'appréciation de la qualité des métaux si l'on pouvait facilement, en prenant une éprouvette de forme et de dimensions quelconques, rapporter ses résultats globaux à une unité commode et sûre qui, pour un même métal, donnât toujours un même résultat.

La forme de la section pourrait, au besoin, être laissée de côté et il serait facile, pour des essais de recette par exemple, d'adopter la forme circulaire dans chaque cas, mais le diamètre du cercle, c'est-à-dire le diamètre des barrettes cylindriques employées, n'aurait-il pas une influence sur les résultats des essais? D'autre part, la longueur de ces barrettes cylindriques n'aurait-elle pas également un effet?

On voit que, même en simplifiant, autant qu'on le peut, le problème de la torsion, les questions à résoudre en ce qui le concerne sont nombreuses. Il nous a paru cependant qu'il était intéressant de l'examiner d'un peu près et de

Le Laboratoire d'Essais ne prend pas la responsabilité des opinions scientifiques soutenues par les collaborateurs du *Bulletin*.

répondre aux deux questions de l'influence du diamètre et de l'influence de la longueur sur les caractéristiques des essais de torsion que nous avons l'habitude d'envisager.

Les facteurs de l'essai qui peuvent être influencés par la variation du diamètre et de la longueur sont : le moment du couple de torsion à la limite d'élasticité, le moment maximum, le moment de rupture, l'angle à la rupture, le travail de torsion.

Comment varient ces éléments pour des métaux différents, quand le diamètre des barreaux cylindriques varie de 16 à 10 millimètres et quand la longueur de barrettes passe de 100 millimètres à 0 millimètre par exemple ? Telles sont les questions que nous nous sommes posées et les conditions expérimentales que nous avons adoptées.

Les métaux choisis ont été des aciers et des fers. Nous avons pris de l'acier dur à 0,70 de carbone, de l'acier mi-dur à 0,38 de carbone, de l'acier extra doux à 0,10 de carbone et deux fers dont l'un phosphoreux et l'autre pur et de bonne qualité.

Les barres dans lesquelles on a prélevé les barreaux étaient carrées et avaient 18 millimètres de côté. Cette forme carrée est commode pour l'amarrage des barrettes. Il suffit, en effet, d'emmancher celles-ci à frottement doux dans des trous carrés ménagés dans les organes de torsion et de mesure de la machine et leur entraînement se fait sans glissement ou broutement comme c'est trop souvent le cas pour des barrettes rondes un peu grosses.

Deux séries d'éprouvettes ont ainsi été préparées. L'une avait 100 millimètres environ de longueur cylindrique, l'autre 0 millimètre. Pour cette dernière, en effet, on avait simplement effectué une entaille aiguë (avec un angle de 90°) dans chacune des barres cylindriques. Les sections à fond d'entaille étaient d'ailleurs les mêmes que celles des barrettes de 100 millimètres de longueur et comprenaient trois diamètres : 16 millimètres, 14 millimètres et 10 millimètres dans chaque série d'éprouvettes.

Les aciers employés étaient assez homogènes et les éprouvettes avaient été prises dans une même barre pour chaque métal. Quant aux fers on ne saurait être affirmatif en ce qui concerne leur homogénéité ; ces produits sont hétérogènes par nature, leurs résultats sont, de ce fait, toujours un peu aléatoires.

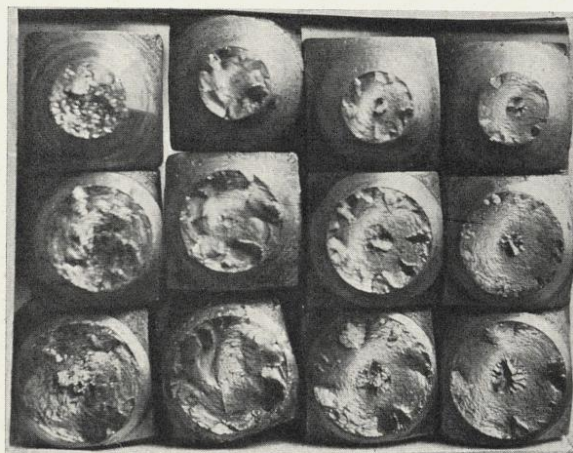
La machine de torsion qui nous a servi, capable de mesurer des couples jusqu'à 1.500 kilogrammètres manque un peu de sensibilité pour les faibles moments de torsion des barrettes des métaux les plus mous. Il y a donc lieu de faire certaines réserves en ce qui concerne les résultats obtenus pour ces dernières barrettes qui sont justement les plus anormaux. Avec la machine de torsion, on a mesuré le moment total à la limite élastique, le moment maximum, le moment de rupture et l'angle de rupture. Nous ne parlerons pas de l'angle à la limite d'élasticité qu'on n'a pas évalué, sa détermination précise nécessitant l'installation d'un torsiomètre amplificateur. Nous comprenons sous le nom de limite élastique le moment du couple qui provoque le début des grandes déformations. On le détermine facilement avec un diagramme. Il

Fer
de bonne
qualité

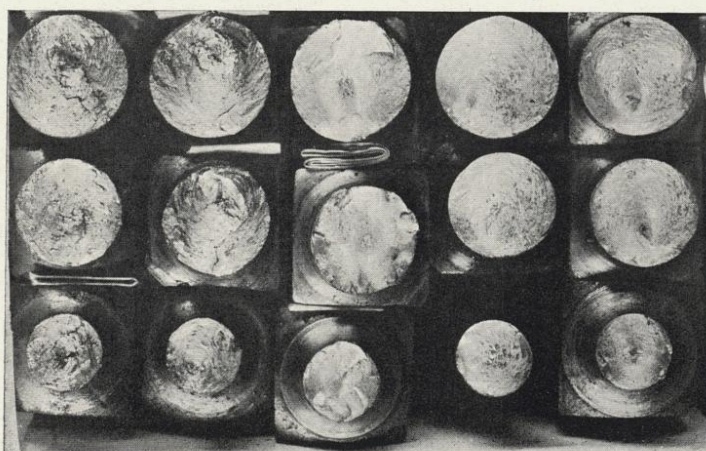
Acier
à 0,10
de carbone

Acier
à 0,38
de carbone

Acier
à 0,70
de carbone



I. — Barreaux incisés.



Fer
phosphoreux

Fer
de bonne
qualité

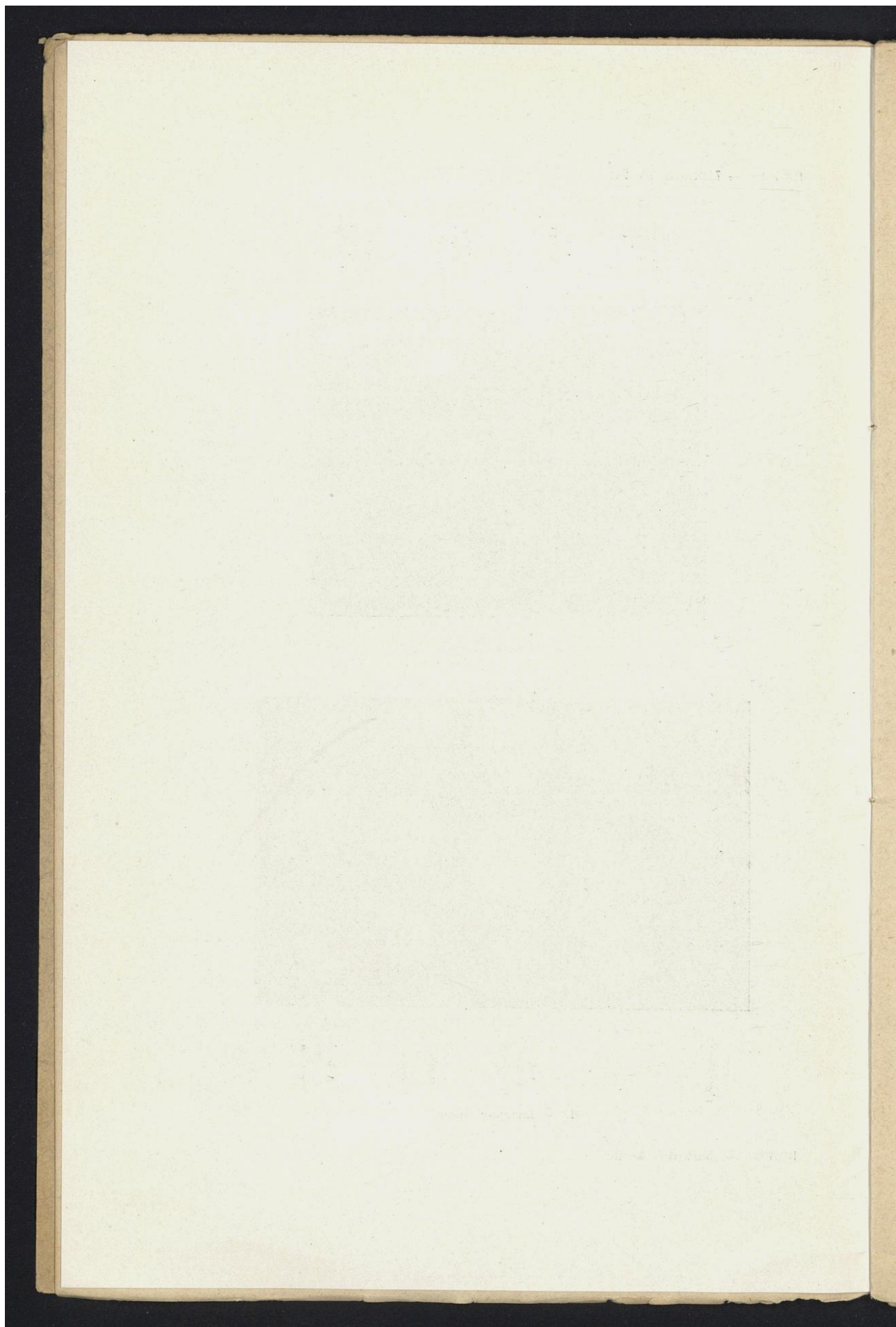
Acier
à 0,10
de carbone

Acier
à 0,38
de carbone

Acier
à 0,70
de carbone

186
CNAM

II. — Barreaux lisses.



se décèle par un palier plus ou moins tourmenté tout comme dans les essais de traction. Il y a même une certaine difficulté à se prononcer sur le moment à adopter pour qualifier cette limite. Doit-on prendre la fin de la ligne droite correspondant à la cessation des déformations proportionnelles aux efforts ou bien le palier moyen tracé à travers les zigzags du diagramme. C'est là une question controversée. Pour notre part, dans les essais suivants, nous avons adopté la fin de la ligne droite de la première partie du diagramme. Nous avons à signaler que le diagramme des barreaux ayant 100 millimètres présentait la forme connue, et souvent décrite par Thurston notamment : ce diagramme avait une allure de parabole très aplatie. La parabole était d'autant plus aplatie que les métaux étaient plus doux. Nous estimons qu'on ne se tromperait pas de beaucoup en remplaçant cette parabole par une ligne droite et en reliant les moments après la limite élastique aux angles de torsion par une formule de la forme suivante :

$$M = K\alpha$$

M moment, α angle et K coefficient variable avec les métaux et les dimensions des barrettes.

Ce sont surtout les fins de courbes qui répondent bien à cette formule, elles sont en effet de véritables lignes droites. Les barreaux incisés, c'est-à-dire, avec une longueur égale pratiquement à 0, nous ont montré un diagramme de torsion très curieux. Comme pour les barreaux lisses de 100 millimètres de longueur, nous avons bien eu le palier AB à la limite, palier très court d'ailleurs,

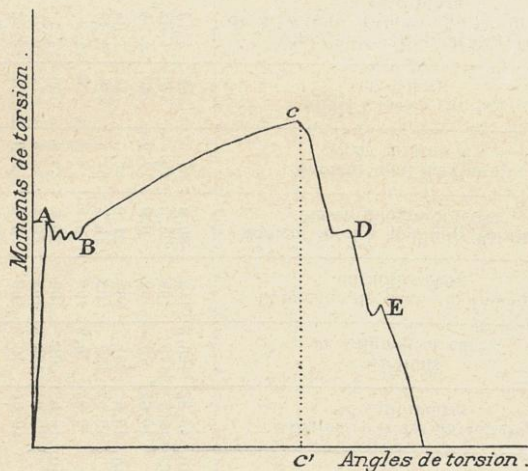


Fig. 1.

alors qu'avec ces barreaux lisses il est parfois considérable (figure 1). On a bien eu aussi la portion de diagramme BC entre la fin du palier et le moment

Résultats de la torsion des barreaux lisses

Nature des métaux	Résultats bruts des essais de torsion						Essais de traction										
	Diamètre D des barrettes en millimètres	Sections en millimètres carrés	Longueur de partie cylindrique en millimètres	Moment total à la limite d'élasticité Me en kilogrammètres	Moment total maximum Mr ou de rupture en degrés	Angle total de rupture en degrés	Angle de rotation en degrés de 2 sections distantes de 1 mm. lors de la rupture	Glissement d'un point situé sur une génératrice distant de 1 mm. du 1 ^{er} par rapport à un point de la même génératrice distant de 1 mm. du même	Travail total de torsion en kilogrammètres pour la rupture	Travail de torsion pour la rupture en kilogrammètres par cm ² de métal tordu	Limite d'élasticité en kilogrammes par millimètre carrés	Charge maximum dite de rupture en kilogrammes	Allongement à la rupture	Striction	Tension τ_e en kilos sur la fibre extrême pour la limite d'élasticité	Tension τ_r en kilos sur la fibre extrême pour la rupture	Travail par cm ² d'après la formule de Kormilowicz
Acier Martin à 0,70 de carbone.	43,82 44,1 40,4	196,5 179 79	112 104 99	30,0 25,5 9,0	57,3 40,5 17,0	462 470 488	4,43 4,52 4,94	0,56 0,55 0,525	430 340 128	49,5 48,3 16,4	47,9	80,0	15,0	0,32	39 44,3 45,5	74 66,5 86,0	20,75 18,25 18,10
Acier Martin à 0,38 de carbone.	46,0 43,95 9,90	204 152 76,9	104 102 101	24,0 45,5 6,85	46,5 34,5 9,0	744 840 1.128	7,38 8,25 11,2	1,05 1,00 0,95	535 384 188	25,5 24,7 24,2	32,8	60,5	25,0	0,43	26,3 36,0 36,5	58,5 52,5 47,5	29,5 26,7 22,7
Acier Martin à 0,42 de carbone.	46,0 43,97 40,4	204 153,5 79	106 104 100	20,3 40,8 4,0	33,8 22,0 8,0	1.500 2.072 2.262	4,4 20,9 22,62	1,94 2,50 1,96	836 610 250	39,0 38,5 34,3	24,3	35,5	30,0	0,71	25,5 18,0 20,3	42,5 36,8 40,5	41,5 46,0 40,0
Fer phospho- reux.	46,0 44,1 40,1	204 179 80,4	106 105 95	49,6 40,0 2,57	36,0 23,2 8,3	840 856 797	1,40 0,94 0,47	1,40 0,94 0,47	454 328 112	21,2 17,4 14,6	27,4	39,6	46,0	0,32	24,5 16,4 16,4	45,0 38,0 44,5	24,75 17,7 9,95
Fer de bonne qualité.	45,97 44,07 9,97	200 178 78	106 105 98	44,5 9,2 3,5	32,3 23,9 7,5	2.000 1.460 1.460	18,9 13,9 11,8	2,55 1,86 1,05	1.060 510 234	50,0 27,3 17,5	24,0	35,8	25,0	0,43	18,2 16,4 18,5	40,5 39,5 38,7	54,5 35,5 19,75

Résultat de la torsion des barreaux incisés

Nature des métaux	Diamètre à fond d'incisions en mm.	Sections à fond d'incisions	Moment total à la limite d'élasticité Me en kgmètres	Moment maximum	Angle maximum en degrés	Angle total de rupture en degrés	Travail total de rupture en kgmètres	Tension τ_2 en kilos sur la fibre extrême à la limite d'élasticité	Tension τ_1 en kilos sur la fibre extrême à la rupture	Glissement total en mm.	Travail de rupture par cm ² de section en kgmètres à fond d'entaille
Acier à 0,70 de carbone	15,7	193,6	46,5	57,5	47,5	25,0	21,0	61,5	76,0	2,35	40,8
	14,0	153,9	38,5	44,5	46,0	48,4	40,8	74,0	83,5	4,83	7,0
	9,7	73,9	44,5	44,5	47,5	22,4	4,7	81,0	81,0	4,46	6,35
Acier à 0,38 de carbone	16,5	243,8	32,0	45,5	21,6	46,5	28,5	36,5	52,0	3,06	43,4
	13,9	154,7	22,0	32,0	25,5	28,7	43,2	42,0	61,0	3,05	8,75
	9,5	70,9	7,5	11,5	25,6	30,5	4,8	44,7	68,5	2,46	6,80
Acier à 0,42 de carbone	15,5	188,6	21,0	33,0	107	109	55,0	29,0	45,5	44,3	28,3
	13,7	147,4	16,0	22,0	83	91	31,2	32,0	44,0	41,5	21,2
	9,5	70,9	7,0	8,0	83	96	43,4	42,0	48,0	6,80	49,2
Fer phosphoreux.	15,9	198,5	26	35,5	57,5	60,5	30,3	32,7	44,0	7,9	45,3
	13,9	151,7	21	27,0	36,8	56	45,7	40,0	51,5	4,4	40,3
	9,9	76,9	3,4 ?	6,75	22,5	32	2,8 ?	? ?	38,2	1,87	3,65 ?
Fer de bonne qualité	essais non exécutés										

maximum, partie également courte et d'autant plus petite que le métal était plus dur mais contrairement à la partie du diagramme des longues barrettes située après le maximum ; celle des barrettes entaillées ne se réduit pas à une ligne droite telle que CC'. En effet, nous avons constaté, pour chacun des métaux, des arrêts en D et en E pendant lesquels le moment restait constant ou tendait à se relever. Le fait doit être attribué à ce que la rupture à la torsion d'un barreau incisé ne se fait pas d'un coup comme celle d'un barreau cylindrique long. Il semble que les points de la section incisée les plus éloignés de l'axe se déchirent d'abord sans entraîner la séparation immédiate des tronçons de la barrette tordue. Le noyau de la section continue à se tordre pour son propre compte puis cède à son tour. On comprend donc qu'il y ait des étapes dans la cassure du barreau incisé.

Ce sont là des phénomènes absolument analogues à ceux que nous avons décrits dans notre mémoire sur les essais de barreaux entaillés, tractionnés ou fléchis, présenté en mai 1904 à l'Institut du fer et de l'acier à Londres (1).

D'ailleurs les cassures des barreaux incisés ou non représentées dans la figure I et II montrent bien, d'une part, par leurs arrachements dans le cas des barreaux incisés et par leur planéité presque complète dans le cas des barreaux lisses que ces cassures sont d'une nature différente et que le déchirement des sections incisées se fait par étapes comme le diagramme précité l'indique.

Dans les tableaux ci-après nous donnons, dans les premières colonnes, les résultats bruts des essais des barrettes. Dans les colonnes suivantes nous donnons des chiffres issus d'opérations effectuées avec ces résultats, opérations plus ou moins logiques et qui peuvent être anéanties par d'autres plus conformes à la réalité des faits, interprétant mieux ces faits, mais que nous n'avons pas devinées. Nous ajoutons au tableau les résultats des essais de traction des divers métaux employés.

Examen des résultats pour les barreaux lisses et entaillés

Il s'agit de faire parler les chiffres bruts des essais, de dégager, si possible, pour les différents facteurs de la torsion quelques règles qui les unissent aux trois variables envisagées : le diamètre, la longueur des barrettes et la nature des métaux. Rappelons tout d'abord la formule connue de la résistance des matériaux qui relie le moment de la torsion M à la sollicitation unitaire τ supportée par le métal à une distance r de l'axe de torsion, dans les cas d'une pièce à section circulaire.

$$M = \tau \frac{\pi}{2} r^3$$

(1) Bulletin n° 4 du Laboratoire d'Essais.

(voir *Traité des essais des matériaux*, par Martens, édition française, traduction P. Breuil, page 162, chez Gautier-Villars).

Cette formule, qu'on établit théoriquement, est basée sur deux hypothèses : La première de ces hypothèses admet que les sollicitations unitaires sont proportionnelles aux rayons des circonférences sur lesquelles sont situées les surfaces unitaires infiniment petites qui subissent ces sollicitations. La seconde admet que les déplacements de ces surfaces sont proportionnels aux tensions subies par elles ; le rapport de ces deux éléments qualifie le coefficient de glissement.

Cette formule n'est valable (du moins on l'a toujours cru jusqu'à présent), que jusqu'à la limite d'élasticité du métal. Et par limite d'élasticité il faut comprendre la sollicitation à partir de laquelle les glissements cessent d'être proportionnels aux sollicitations.

Limite d'élasticité. — De la formule précédente on peut facilement déduire τ si l'on mesure M et r , comme cela nous est possible dans nos essais, mais il faut admettre que la formule s'applique au cas des limites d'élasticité relevées dans nos essais et qui sont différentes sûrement des limites de proportionnalité. En effet les limites que nous avons mesurées sont celles qui correspondent au commencement des grandes déformations du métal et sont les analogues de ce qu'on appelle « limites apparentes d'élasticité » dans les essais de traction, de compression ou de flexion. Quoi qu'il en soit, il paraît logique de vérifier si les sollicitations τ déterminées d'après la formule précitée pour ces limites apparentes de torsion sont les mêmes quel que soit le diamètre des barrettes d'un même métal.

Il est bien évident que ce sont les molécules du métal situées le plus loin de l'axe de torsion qui ont la sollicitation la plus grande et qui atteignent leur limite d'élasticité les premières ; c'est donc pour le rayon $r = \frac{d}{2}$ d étant le diamètre des barrettes qu'il faut tenir notre raisonnement.

Les tensions τ_e ainsi calculées, sont affectées de l'indice e , pour qu'on les distingue des tensions de rupture ; on les a inscrites dans une colonne de chacun des tableaux précédents.

Dans le cas des barreaux lisses, on peut constater que ces sollicitations τ_e sont assez indépendantes du diamètre des barrettes. Il y a d'assez forts écarts, irréguliers d'ailleurs, c'est là une constatation qu'il serait puéril de cacher, mais nous avons déjà dit plus haut que nos mesures pour de faibles moments peuvent être affectées de quelques erreurs. D'autre part nos barres n'avaient peut-être pas une homogénéité parfaite et il aurait fallu multiplier les essais pour avoir des chiffres moyens plus conformes à la vérité. Nous n'en avons ni le temps ni les moyens.

Ces réserves, faites une fois pour toutes, s'appliquent à tous les autres facteurs de ces essais de torsion. Nos résultats ne font qu'effleurer le sujet ; par conséquent, ils doivent être repris et complétés pour être confirmés ou anéantis.

Nous estimons en résumé qu'on peut déduire de nos essais la règle suivante :

La sollicitation unitaire à la limite apparente d'élasticité de torsion et dans le cas de barreaux cylindriques lisses ne paraît pas dépendre du diamètre des barreaux et suit en cela les lois de la résistance théorique des matériaux.

Pour les barreaux incisés, il n'en est pas de même en apparence du moins ; les sollicitations τ_e augmentant régulièrement quand le diamètre de l'entaille diminue. C'est là une constatation absolument analogue à celle que nous avons faite à propos de barreaux qui avaient été incisés de la même façon que les barreaux de torsion actuels, mais qui avaient été essayés à la traction. Comme pour ces barreaux de traction, nous croyons qu'il est nécessaire de ne pas trop se hâter de conclure en faveur de l'accroissement de τ_e pour un diamètre à fond d'incision décroissant, car, il est très difficile de savoir si l'on n'a pas dépassé la limite élastique dans le fond de l'entaille quand le diagramme tracé accuse le coude caractéristique de cette limite. Il est possible que dans la section minimum cette limite ait été atteinte depuis longtemps (c'est-à-dire pour un τ_e inférieur), quand la déformation devient brusquement mesurable sur le diagramme, cette déformation n'étant que la sommation des déformations infinitésimales des sections encadrant la section minimum. On comprend que cette influence se fasse d'autant plus sentir que la section d'entaille est plus petite. La limite apparente d'élasticité à la torsion des barrettes cylindriques sans entailles et bien calibrées n'offre pas une pareille difficulté de mesure, d'où des chiffres moins anormaux pour son cas.

Il faut attirer l'attention sur la concordance assez grande entre les valeurs des sollicitations unitaires dans le cas des deux limites de torsion et de traction des barreaux lisses. Il y a des écarts, répétons-le, cependant l'obtention de chiffres aussi rapprochés n'est pas sans intérêt.

Rupture. — Nous avons eu l'idée de voir si la formule précédente $M = \tau \frac{\pi}{2} r^3$ pouvait s'appliquer au cas de la rupture des barrettes de torsion ; la valeur τ_r qu'on obtient en se servant de cette formule dans laquelle M devient le moment de rupture des barrettes, est inscrite, pour chaque barrette, dans une colonne des deux tableaux précédents. Là encore il est curieux de constater que les valeurs τ_r , pour un même métal, sont assez rapprochées l'une de l'autre quel que soit le diamètre des barrettes et que ces valeurs diffèrent assez peu des résistances à la traction des divers métaux.

C'est une conclusion analogue à celle émise à propos des limites d'élasticité. Les écarts qu'on constate pour un même métal ne suivent pas de loi fixe et sont parfois très faibles.

De sorte qu'on pourrait fort bien passer des essais de torsion aux essais de traction ou inversement au moyen de la formule assez simple qui nous a servi jusqu'ici.

Ce qui rend cette transition séduisante c'est qu'on peut la réaliser en opérant

sur des barrettes incisées, c'est-à-dire sans préparation coûteuse. En effet, les sollicitations τ_r calculées avec les barrettes de torsion incisées paraissent suivre des lois tout à fait analogues à celles des barreaux lisses et ont des valeurs du même ordre que celles de ces derniers barreaux.

Nous avons donc trouvé une mesure commune à laquelle on peut rapporter les résultats globaux des essais de torsion, et cette mesure c'est la sollicitation unitaire qui est supportée par le métal des barrettes à section circulaire, sur la circonférence extérieure de cette section, lors de la rupture des barrettes. Et de plus, il se trouve que cette sollicitation, qui paraît indépendante du diamètre des barrettes (ce qui est assez logique en somme) est à peu près égale à la charge dite de rupture du métal à la traction, charge qui ne dépend pas non plus des dimensions transversales des barrettes. Il faut reconnaître que la tension de rupture par torsion s'obtient avec une formule un peu plus compliquée que celle par traction.

Glissement. — Dans le cas des barreaux lisses, nous avons calculé le glissement maximum du métal lors de la rupture des barrettes de torsion, en mesurant le chemin parcouru par un point de la surface latérale des barrettes par rapport à un autre point distant de 1 mm. et situé, avant l'essai, sur la même génératrice que lui. Ce glissement est consigné dans une colonne du premier tableau. Les diverses valeurs ainsi obtenues paraissent, elles aussi, être assez indépendantes des diamètres des barrettes, bien que là encore il y ait des anomalies qu'il faudrait soigneusement contrôler par de multiples essais.

Ces écarts dans les glissements unitaires de rupture ne sont pas rares d'ailleurs, M. Schüle et M. Brunner en ont montré de semblables pour des fils de cuivre très homogènes qu'ils ont étudiés au Laboratoire du Polytechnicum de Zürich et qui ont fait l'objet d'une publication dans le n° 10 des *Mitteilungen* de ce Laboratoire réputé.

MM. Schüle et Brunner qualifient ce coefficient unitaire du nom de coefficient de torsion en s'inspirant d'une dénomination préconisée par M. Kornilowicz. Ils y attachent la plus grande importance car ce coefficient leur paraît être un critérium très utile des qualités de malléabilité du métal. Nous opinerons comme eux. Cependant nous ne pensons pas que ce soit là un coefficient aussi important que l'allongement ou la striction du métal obtenus dans les essais de traction. Un exemple le prouvera : le fer phosphoreux de mauvaise qualité employé dans nos essais a un coefficient de torsion fort bon et qui n'est pas en sympathie avec son allongement de traction assez faible.

Nous signalerons d'ailleurs les résultats de déformation par torsion encore passables qu'on peut obtenir avec certains alliages qui par traction donnent tout au plus 2 à 3 0/0 d'allongement.

Pour les barreaux incisés, nous n'avons pas pu établir le glissement unitaire précité, car ce que nous avons mesuré comme déformation c'est la rotation d'une partie de barreau extrêmement courte mais dont la longueur n'était pas définie. Il est fort probable que le fond des entailles n'était pas une ligne et que, en outre, certaines sections de métal de part et d'autre de la section minimum ont

participé à la déformation totale. C'est ce qui explique les angles de torsion assez grands que nous avons trouvés pour la rupture de ces barreaux incisés. D'ailleurs, on peut évaluer les angles de rupture de deux façons pour ces barreaux incisés : 1^o ceux correspondant au moment maximum, les seuls qui, à notre avis, aient une signification précise ; 2^o ceux correspondant à la séparation des deux parties des barrettes.

Les premiers sont plus précis que les seconds parce que l'on peut admettre que c'est pour ces angles que commence la déchirure des fibres extrêmes du métal, tandis que les seconds comprennent les premiers auxquels s'ajoutent les angles de torsion nécessaires pour que la déchirure atteigne de proche en proche l'axe de la barrette (1).

On peut supposer que, contrairement au cas des barreaux lisses, les barreaux entaillés ont les molécules d'une même section assez peu régulièrement sollicitées puisque la cassure de ces barreaux demande des rotations supplémentaires, après la rotation correspondant au moment maximum, alors que dans le cas des barreaux lisses la rupture se produit presque toujours pour ce moment maximum.

L'emploi des barreaux incisés serait, pour cette raison, moins recommandable que celui des barreaux lisses.

Pour des essais courants et précis, on peut d'ailleurs nettement préconiser une longueur assez faible pour ces derniers barreaux ; on acquiert, en effet, l'assurance que le glissement unitaire est indépendant de cette longueur quand on examine la régularité extrême avec laquelle une ou deux génératrices tracées préalablement sur les barrettes s'enroulent en hélices sur le corps de ces barrettes. Le pas de ces hélices est aussi constant qu'on peut le souhaiter sur tout le corps des barreaux lorsqu'on a affaire à des métaux homogènes. Et les écarts dans ce cas pourraient justement servir à qualifier l'hétérogénéité du métal, comme nous avons déjà eu l'occasion de le signaler ailleurs... après d'autres auteurs.

Une autre particularité intéressante se rapportant aux déformations de torsion est celle qu'on peut constater par la mesure du diamètre après la rupture par torsion des barrettes cylindriques. Ce diamètre est le même qu'avant la rupture des barrettes ; il ne semble pas y avoir d'écoulement du métal dans le sens de l'axe, du moins c'est ce que nous avons constaté avec nos barrettes.

Ajoutons que si la longueur des pièces est beaucoup plus grande que leur diamètre (50 à 100 fois par exemple). Cet écoulement axial est certain et plus ou moins notable suivant la nature du métal.

Nous avons eu la pensée de vérifier si la constatation faite par nous de l'ap-

(1) Ces considérations sont calquées sur celles que nous avons émises à propos de la rupture des barreaux incisés rompus par traction.

Elles sont en parfaite concordance avec les vues de M. de Fréminville, qui, l'un des premiers, a attiré l'attention sur l'importance du début de l'ouverture des entailles dans le cas des barreaux incisés rompus par flexion.

Résultats comparés de la traction et de la torsion d'aciers plus ou moins carburés tenant ou non du cuivre

Nature des aciers	Traction				Torsion		
	Limite apparente d'élasticité	Charge maximum	Allongement à la rupture	Striction	τ_e à la limite d'élasticité	τ_r à la charge maximum	Glissement unitaire de rupture en mm.
Aciers à carbone 0,15 de 0,5 à 4,0	44,6 38,8 41,5 47,5 60,5	54,1 47,1 49,5 62,5 77,4	14,5 25,5 26,5 28,5 43,0	0/0 52,0 66,0 69,5 46,5	27,3 29,3 27,2 27,2 58,0	54,0 49,3 52,0 52,0 73,0	1,10 1,20 1,45 1,51 0,29
Aciers à carbone 0,35 de 0,5 à 4,0	37,6 48,6 45,3 68,5 81,8	58,1 65,5 64,5 79,5 97,1	23,2 20,0 20,5 11,0 11,2	51,0 48,5 47,3 34,5 23,5	28,8 34,7 37,8 46,2 61,0	59,3 53,8 60,0 69,0 86,0	0,95 0,30 0,70 0,465 0,285
Aciers à carbone 0,70 de 0,5 à 4,0	62,4 55,3 98,3 102,2	83,5 89,7 113,5 125,5	12,0 12,5 3,0 2,5	22,6 16,9 25,0 13,0	54,2 55,2 56,0 ?	79,0 89,0 104,0 ?	0,425 0,390 0,182 ?
Aciers à carbone 1,0 de 0,5 à 3,0	63,8 71,1 66,3 97,5	88,9 102,0 111,0 117,0	9,0 5,5 6,0 3,5	15,0 4,0 7,0 1,0	44,0 48,0 53,6 62,5	74,5 85,5 88,5 92,5	0,28 0,27 0,27 0,255

plication possible de la formule $M = \frac{\pi}{2} \tau r^3$ à la détermination de τ_r n'était pas fortuite. Les valeurs τ_r pour la sollicitation de rupture par torsion, qui concordent assez bien avec les charges de rupture par traction dans le cas des barreaux objets de cette étude, ne sont pas un fait du hasard. En effet, en appliquant les mêmes raisonnements à des résultats d'essais de traction et de torsion d'aciers au cuivre présentés au meeting de mai 1907 de The Iron and steel Institute, nous avons obtenu les valeurs contenues dans le tableau suivant (page 13) et ces valeurs nous apprennent que la sollicitation τ_r pour ces aciers au cuivre est à peu de chose près la même que la charge maximum de traction.

Par contre, les sollicitations de traction et de torsion à la limite d'élasticité ne concordent pas.

Les barreaux des aciers au cuivre avaient 18 mm. de diamètre et 100 mm. de longueur de partie cylindrique, c'est-à-dire étaient un peu plus gros que ceux employés dans la présente étude.

Les choses se passeraient-elles de la même façon pour des diamètres très différents de ceux utilisés par nous, c'est-à-dire pour de grosses barres ou de tout petits fils, c'est là une question qu'il y aura lieu de résoudre avant de considérer nos conclusions comme susceptibles d'être employées.

Travail de torsion. — Nous avons pu, grâce aux diagrammes tracés pendant les essais, calculer les travaux de torsion de chaque barrette et rapporter ces travaux à une unité généralement adoptée par tous : le cm³ de métal déformé (Les résultats obtenus pour les barrettes lisses sont relatés dans le premier tableau).

On peut conclure de ces résultats que le travail de torsion unitaire est là encore assez indépendant des diamètres des éprouvettes, la chose était facile à prévoir. Il y a des anomalies surtout pour les fers. En ce qui concerne le travail de rupture des barrettes incisées il n'est pas possible de le rapporter au cm³ de métal déformé parce qu'on ignore quel est le volume de métal qui a participé à la déformation ; pour ces barreaux, nous avons divisé les travaux totaux obtenus par les sections à fond d'entaille et on a ainsi obtenu des chiffres qui, pour un même métal, diminuent avec le fond d'incision mais paraissant tendre vers une limite. Il n'est pas imprudent, à notre avis, de signaler que les résultats des barreaux incisés profondément nous paraissent moins susceptibles d'erreurs que ceux des barreaux peu incisés. Il peut se faire, en effet, que, pour une faible profondeur d'entaille, la barrette se torde loin de cette entaille et que, par suite, les essais en soient considérablement troublés.

Existe-t-il une relation entre le travail de rupture de torsion de barreaux entaillés ou non et celui de barreaux de traction du même métal, essayés statiquement ou dynamiquement ? C'est une question qu'on peut se poser logiquement. Voici quelques renseignements à ce sujet. Il s'agit de travaux en kilogrammètres par cm³ de métal déformé pour les barreaux lisses ou par cm² de section à fond d'entaille pour les barreaux entaillés.

Les travaux de rupture statiques des barrettes entaillées de torsion et de

Traction

	Barreaux lisses (kgm.) par cm ²		Barreaux entaillés (kgm.) par cm ² (Les barreaux avaient reçu deux traits de scie de chaque côté de leur axe),	
	<i>Lente</i>	<i>Par choc</i>	<i>Lente</i>	<i>Par choc</i>
Acier à 0,70 de carbone	40	49,2	8,9	10,5
Acier à 0,38 de carbone	45,2	49,2	43	24,6
Acier à 0,40 de carbone	43,8	49,2	45	28,0
Fer phosphoreux	6,9	4,24	8,2	7,0

traction peuvent jusqu'à un certain point être considérés comme du même ordre. Les travaux de rupture par choc dans le cas de la traction sont affectés d'erreurs que nous avons établies ailleurs (1), et nous ne les donnons ici que pour mémoire. Quant aux travaux des barrettes lisses de torsion, ils diffèrent considérablement de ceux des barrettes lisses de traction et ne suivent pas les mêmes lois que ces derniers.

Nous signalerons enfin une intéressante proposition faite par M. Kornilowicz dans *Baumaterialienkunde* en 1904, pour la mesure du travail de torsion de barrettes lisses au moyen d'une formule qui est la suivante :

$$a = \frac{1}{2} \tau_0 s_0.$$

a est le travail par cm³ de métal déformé, τ_0 la tension de glissement moyenne du métal, s_0 le glissement unitaire maximum tel qu'il nous a servi et a été défini par nous précédemment (2). M. Kornilowicz a eu des difficultés à

(1) *Revue de Mécanique*. Avril et Juin 1907.

(2) Pour établir sa formule, M. Kornilowicz a admis :

1° Qu'après la limite élastique, les tensions de glissement augmentent depuis une certaine valeur correspondant à cette limite jusqu'à un maximum ;

2° Que pour un même moment supporté par la barrette, les tensions étaient proportionnelles à la distance du point où elles s'exerçaient à l'axe de torsion. C'est une loi identique à celle déjà signalée pour la période d'élasticité de la torsion.

C'est, en somme, admettre la valabilité de la formule de l'élasticité pour les déformations permanentes de torsion, comme nous l'avons fait nous-mêmes. Mais M. Kornilowicz n'a pas porté son attention sur d'autres facteurs que le travail de torsion en établissant sa formule.



appliquer sa formule parce qu'il ne connaissait pas la tension moyenne τ_0 précitée et qu'il admettait que les tensions croissent depuis 0 jusqu'à un maximum sans loi connue. Or nous avons eu l'idée d'introduire dans cette formule la tension τ_r de rupture dont nous avons établi la valeur dans ce qui précède et avons été très surpris de trouver pour les travaux unitaires a ainsi calculés les valeurs suivantes :

Acier à 0,70 de carbone.	D = 15,82	$a = 20$ kgmètres 75
	— 14,1	— 18,25
	— 10,04	— 18,10
Acier à 0,38 de carbone.	D = 16,0	$a = 29,5$
	— 13,95	— 26,3
	— 9,90	— 22,7
Acier à 0,10 de carbone.	D = 16,0	$a = 41,5$
	— 13,97	— 46,0
	— 10,04	— 40,0
Fer phosphoreux	D = 16,0	$a = 24,75$
	— 14,1	— 17,7
	— 10,1	— ?
Fer de bonne qualité	D = 15,97	$a = 51,5$!
	— 14,07	— 35,5
	— 9,97	— 9,75

Pour les aciers, seuls métaux homogènes étudiés, on peut dire que le travail déterminé par la formule de Kornilowicz avec l'introduction de τ_r en elle est constant pour un même métal et, qu'en outre, il est égal à celui déterminé au moyen du diagramme de torsion. Ce sont là des constatations que M. Kornilowicz n'avaient pas faites. Il faut donc remplacer la valeur moyenne τ_0 de M. Kornilowicz qui est inconnue, par τ_r facile à déterminer.

On pourrait d'ailleurs faire disparaître la tension τ_r et évaluer le travail unitaire a en fonction du moment M de rupture et du nombre de rotation du barreau qui en ont produit la rupture.

En effet, on a dit que :

$$a = \frac{1}{2} \tau_r S_0.$$

Or, d'après ce que nous avons vu :

$$\tau_r = \frac{2 M}{\pi r^3}$$

et S_0 est égal à $\frac{2 \pi r n}{l} \cdot r$, rayon de la barrette ; l , longueur de cette barrette et n nombre de tours pour sa rupture.

En sorte que :

$$a = \frac{1}{2} \frac{2 M}{\pi r^3} \times \frac{2 \pi r n}{l} = \frac{2 M n}{r^2 l}.$$

Avec cette dernière formule on peut calculer le travail unitaire de rupture en mesurant seulement le moment de rupture M et le nombre de tours n , r et l sont les dimensions géométriques des barrettes.

Conclusions. — En résumé, nous avons cru pouvoir, en nous basant sur les quelques essais de torsion ci-dessus, deviner quelques règles importantes qui ont besoin d'être vérifiées par de nombreux essais, nous le reconnaissons, mais qui, si elles étaient confirmées, auraient un intérêt indéniable ; nous les répétons ici :

1° Les sollicitations maxima des barreaux de torsion cylindriques à la limite d'élasticité de ces barreaux calculées par la formule ordinaire de torsion paraissent indépendantes du diamètre de ces barreaux et paraissent être les mêmes que les sollicitations constatées à la limite d'élasticité des barreaux de traction des mêmes métaux ;

2° Les sollicitations maxima de torsion à la rupture calculées par la formule ordinaire de torsion paraissent indépendantes du diamètre des barreaux et paraissent les mêmes que les sollicitations dites de « rupture » des barreaux de traction des mêmes métaux ;

3° Les glissements unitaires de rupture paraissent indépendants des diamètres des barrettes ;

4° Les travaux unitaires de rupture paraissent indépendants des diamètres des barrettes ;

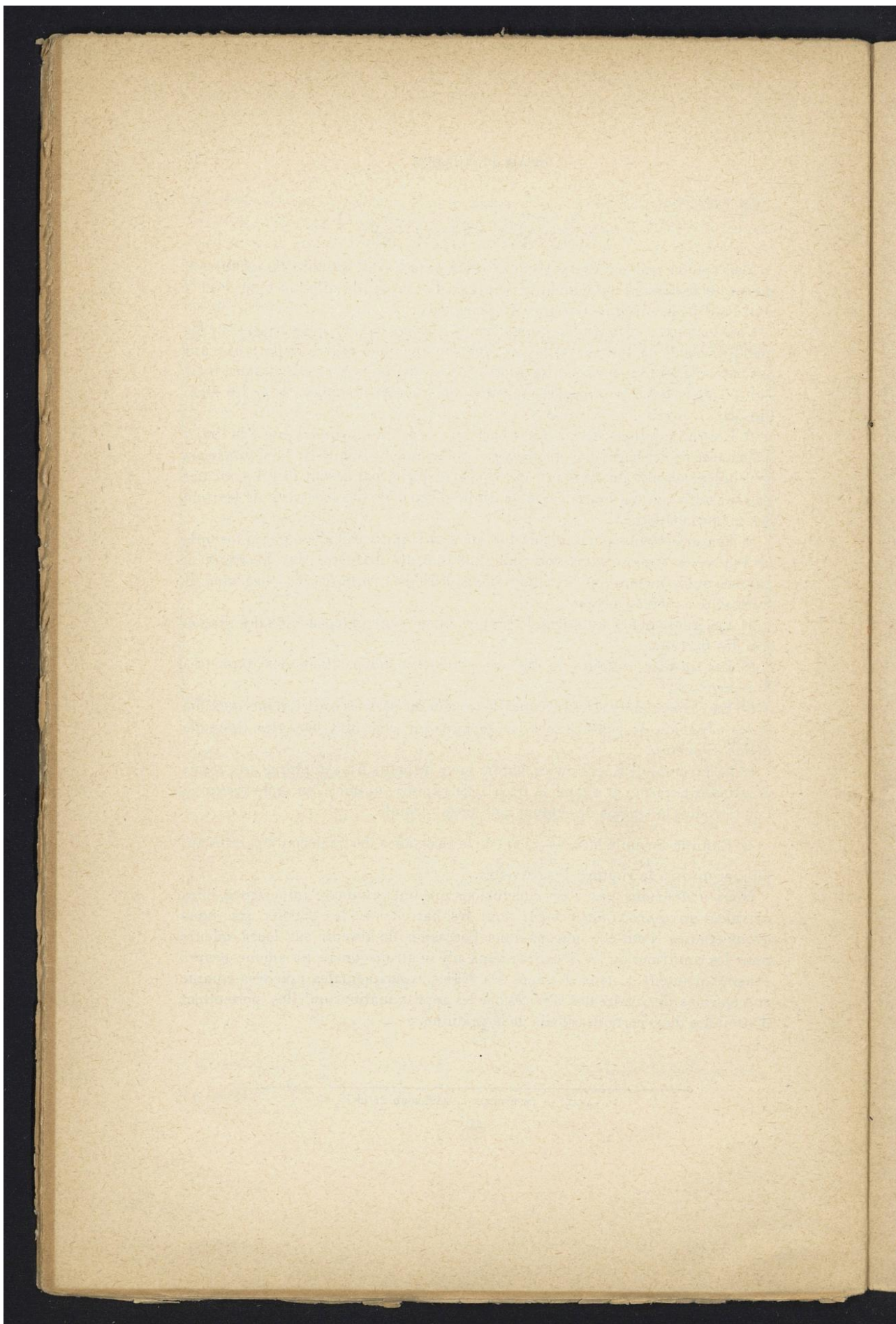
5° En ce qui concerne les barrettes de torsion incisées les sollicitations maxima et les moments de rupture sont les mêmes que ceux des barrettes lisses de même diamètre ;

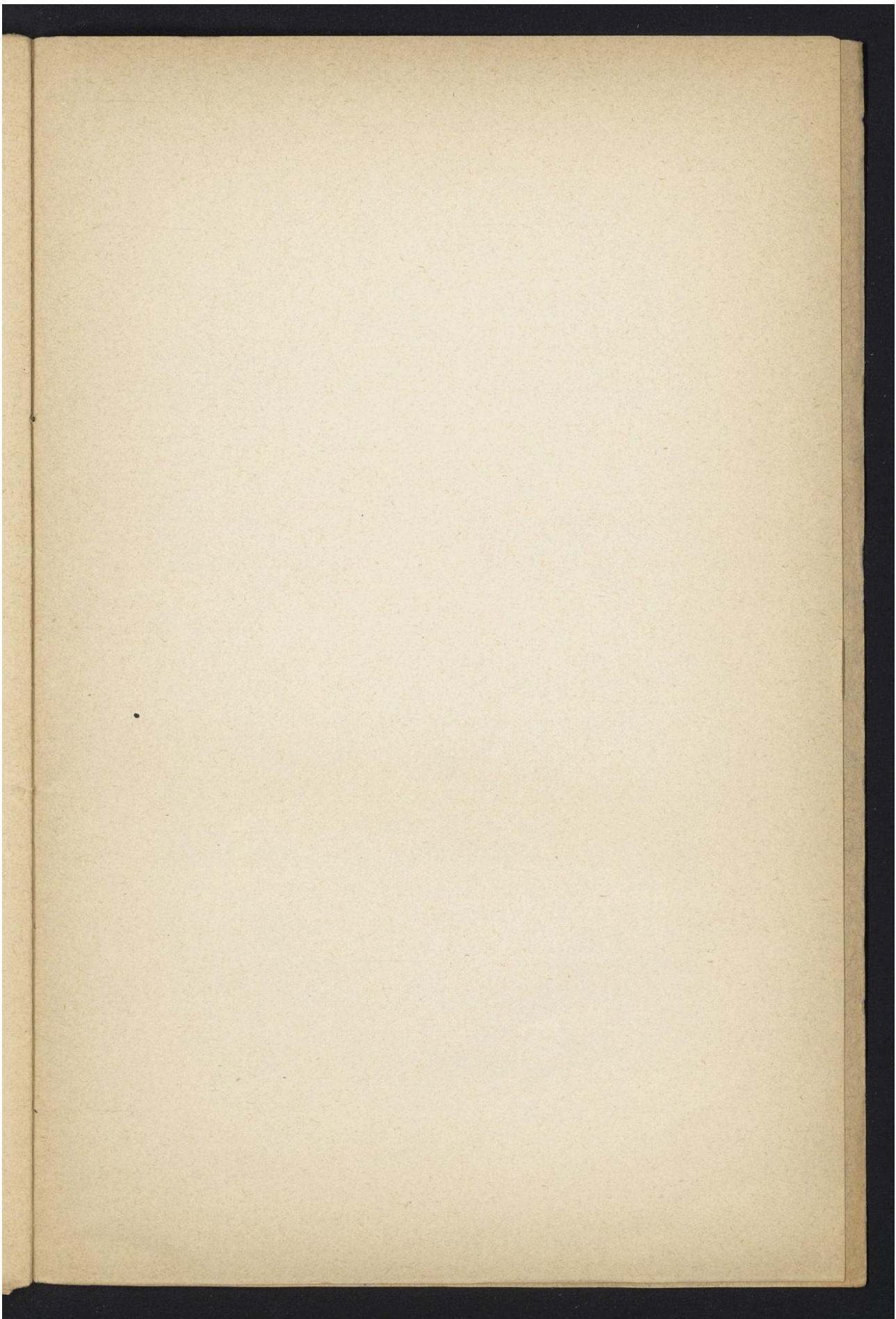
6° La formule de Kornilowicz établie pour de petits fils s'applique aux essais de grosses barrettes et donne le travail de rupture unitaire en vraie valeur si l'on introduit la tension de rupture dans cette formule ;

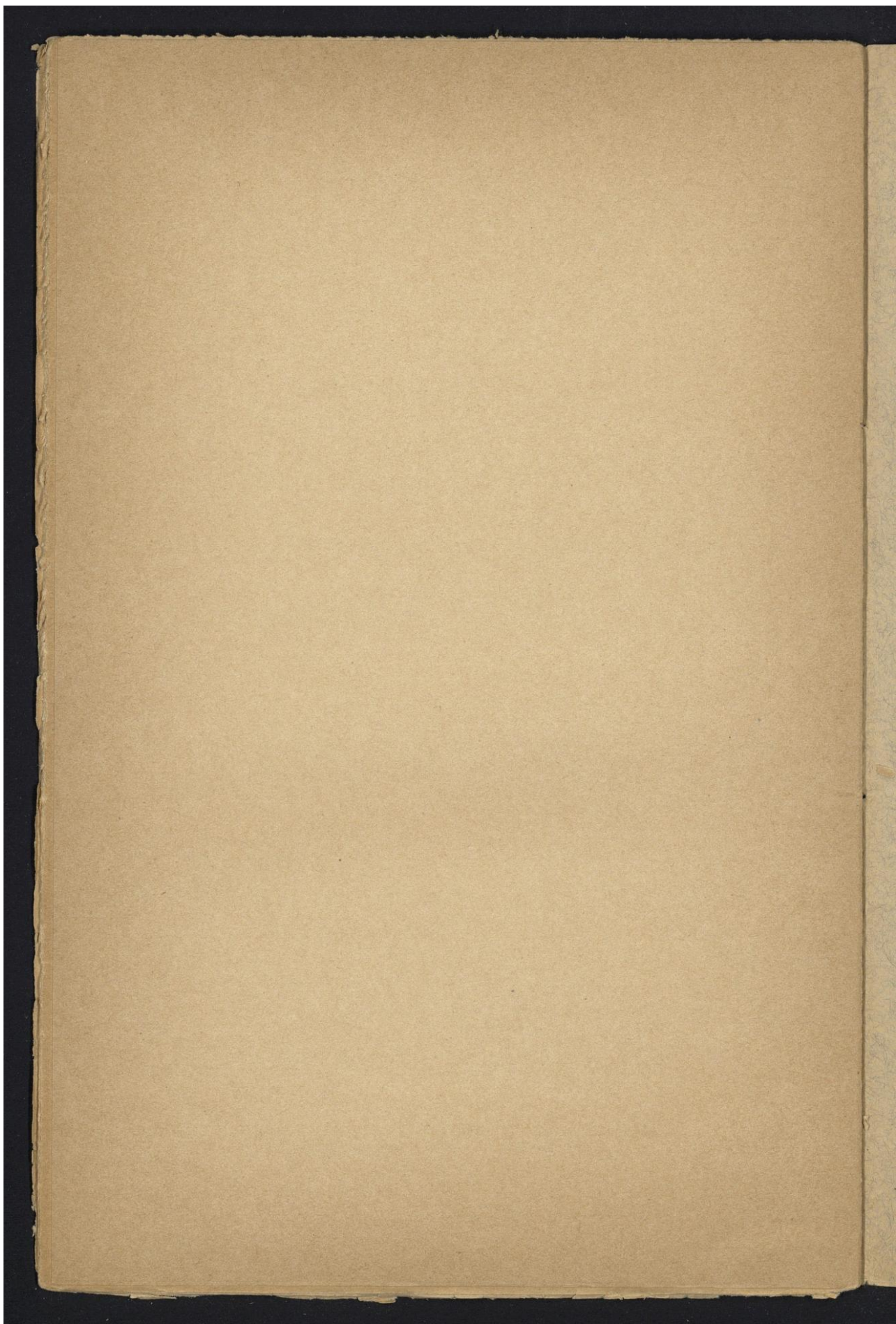
7° Enfin la formule $M = \frac{1}{2} \tau_0 \pi r^3$ de la résistance des matériaux paraît s'appliquer jusqu'à la rupture des barrettes.

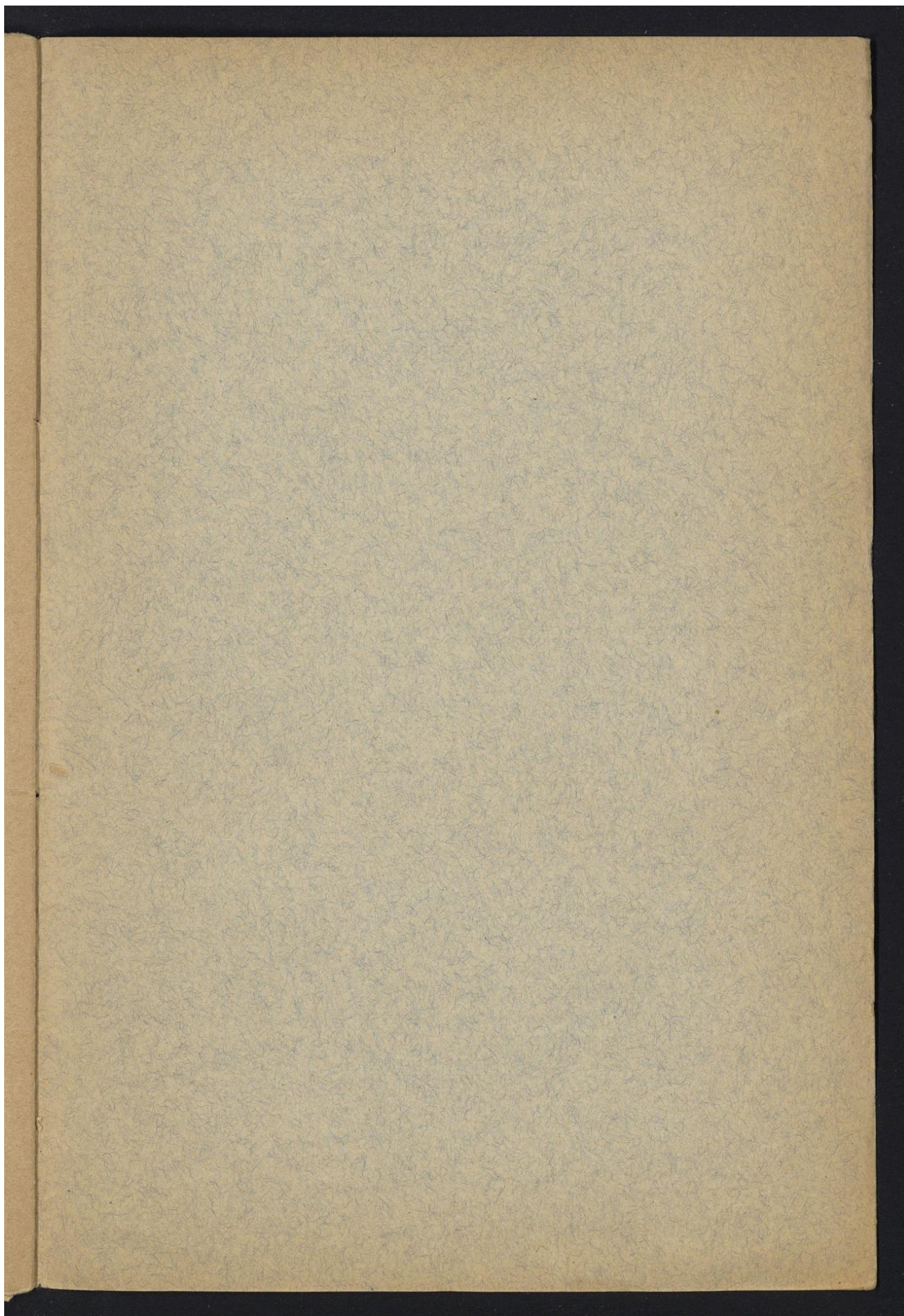
Nous n'attachons pas à ces conclusions une outrecuidante importance, elles ne valent qu'*approximativement* pour les barrettes et les métaux que nous avons étudiés. Peut-être aurons-nous l'occasion de revenir sur leurs valeurs pour les confirmer ou les détruire ; nous n'y mettrons jamais un amour-propre exagéré d'auteur : nous donnons les règles expérimentales précitées comme susceptibles de rendre des services par les approximations qu'elles permettent d'atteindre dans certains calculs de la pratique.











Librairie Polytechnique Ch. BÉRANGER, Editeur

Successeur de BAUDRY & Co

PARIS, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15. — LIÈGE, RUE DE LA RÉGENCE, 21

BULLETIN DU LABORATOIRE D'ESSAIS

MÉCANIQUES, PHYSIQUES, CHIMIQUES ET DE MACHINES

DU

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

Le Bulletin ne sera pas périodique, il paraîtra par fascicules détachés

Organisation et outillage du laboratoire d'essais.

N° 1. Le laboratoire d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines du conservatoire national des Arts et Métiers, son organisation, son outillage, par A. PÉROT, directeur du Laboratoire. 1 brochure in-8° 1 fr. 50

Rapport du Congrès de Berlin, juin 1903.

N° 2. Extrait du rapport de mission donnée au chef de la section des matériaux de construction au Congrès de chimie de Berlin (juin 1903). — I. Laboratoires d'essais. — II. Fabrication du ciment par fours rotatifs. Description de deux usines. — III. Filtre Beeth. — IV. Essais de ciment de fours rotatifs. — V. Sur un procédé simple et rapide permettant de différencier une chaux grasse d'une chaux hydraulique, par E. LEDUC, chef de la Section des matériaux de construction au laboratoire d'essais. Une brochure in-8, contenant des figures dans le texte et 4 planches hors texte. 4 fr.

Action de l'eau de mer sur les mortiers.

N° 3. Action de l'eau de mer sur les mortiers, par E. LEDUC, chef de la section des matériaux de construction. Une brochure in-8°. 1 fr. 50

Métaux ferreux.

N° 4. Contribution à l'étude des relations qui existent entre les effets des sollicitations lentes et ceux des sollicitations vives dans le cas des métaux ferreux (barreaux lisses et barreaux entaillés), par P. BREUIL, chef de la section des métaux du laboratoire d'essais. 1 brochure in-8°. 12 fr.

Nouveau système de longueurs d'ondes étalons.

N° 5. Rapport sur la nécessité d'établir un nouveau système de longueur d'ondes étalons, présenté au nom de la Société française de Physique au Congrès international de physique de l'Exposition de Saint-Louis, par A. PÉROT et FABRY. 1 brochure in-8°. 0 fr. 75

Essais des huiles de pétrole.

N° 6. Essais mécaniques des huiles de pétrole ou autres, effectués au laboratoire d'essais du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, par P. BREUIL. Une brochure in-8° avec figures et tableaux d'essais 2 fr.

Perte de chaleur des enveloppes calorifuges.

N° 7. Manière de mesurer les pertes de chaleur des enveloppes calorifuges. Quelques résultats d'essais faits au Laboratoire par BOYER-GUILLOU, chef de la section des machines et MM. AUCLAIR et LAEDLEIN, assistants. Une brochure in-8° avec deux planches 2 fr.

Essais de compteurs d'eau.

N° 8. Essais de compteurs d'eau, par A. PÉROT, directeur du Laboratoire d'essais et H. MICHEL-LEVY, assistant 4 fr.

Valeurs comparatives des trois étalons lumineux.

N° 9. Rapport sur les valeurs comparatives des trois étalons à flamme : Carcel, Hefner, Vernon-Harcourt, par A. PÉROT, directeur du Laboratoire d'essais et P. JANET, directeur du Laboratoire Central d'Electricité. 0 fr. 75

Sur la constitution intime des calcaires.

N° 10. Sur la constitution intime des calcaires, par E. LEDUC, chef de section des matériaux de construction au Laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers, avec 4 planches et 100 tableaux 20 fr.

Essais sur le plâtre.

N° 11. Essais sur le plâtre, par E. LEDUC, chef de section des matériaux de construction au Laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers, et Maurice PELLER, ingénieur-agronome 1 fr. 50

Examen critique de quelques méthodes de mesure de la puissance utile des voitures automobiles.

N° 12. Examen critique de quelques méthodes de mesure de la puissance utile des voitures automobiles, par J. AUCLAIR, assistant au Laboratoire d'Essais. 1 fr. 50

Essais sur le silico-calcaire.

N° 13. Essais sur le silico-calcaire, par E. LEDUC, chef de la Section des Matériaux de Construction au Laboratoire d'Essais du Conservatoire national des Arts et Métiers et Ch. de la ROCHE