Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 3 (1948)

Rubrik: Free discussion

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

V1

Résultats d'essais sur la dispersion des résistances de l'acier doux de construction

(Résumé succinct)

Untersuchungen über die Streuungskurve der Zugfestigkeit von weichem Baustahl

(Übersicht)

Results of tests on the dispersion of strengths of structural mild steel

(Abstract)

M. CASSÉ

Ingénieur à la Division des Ouvrages d'Art de la S. N. C. F., Paris

Des essais ont été entrepris par la Société nationale des Chemins de fer français, aidée par les Constructeurs métalliques de France, en vue d'étudier la dispersion des caractéristiques de résistance de l'acier doux de construction. De ces essais, pour lesquels on a utilisé des échantillons de provenances aussi variées que possible, il se dégage certains résultats particulièrement remarquables.

Le premier est que, du point de vue de l'étude de la sécurité, les valeurs des résistances assez voisines de la moyenne ne présentent pas d'intérêt. La figure 1 présente, pour la limite élastique et pour la rupture, la courbe des fréquences cumulées des résistances effectives inférieures à une valeur donnée. Les lignes pointillées sont celles que l'on obtiendrait en extrapolant les résultats médians; elles conduiraient à des conclusions fantaisistes si on les utilisait dans la zone où l'expérience montre que se limitent les possibilités de ruine, c'est-à-dire au-dessous de la fréquence 1/1 000. Dans cette zone (3e graphique de la fig. 1), c'est la ligne en traits pleins qu'il faut connaître; cela exige un nombre très grand de mesures.

Aussi, quand nous avons limité à 10 000, pour des raisons pratiques, le nombre des éprouvettes de notre série d'essais, nous nous demandions si ce nombre n'était pas encore dérisoire pour le but poursuivi. Les résultats obtenus nous ont pleinement rassuré; ils permettent de formuler dès maintenant des conclusions précises.

Reprenons les courbes des fréquences cumulées en choisissant, pour

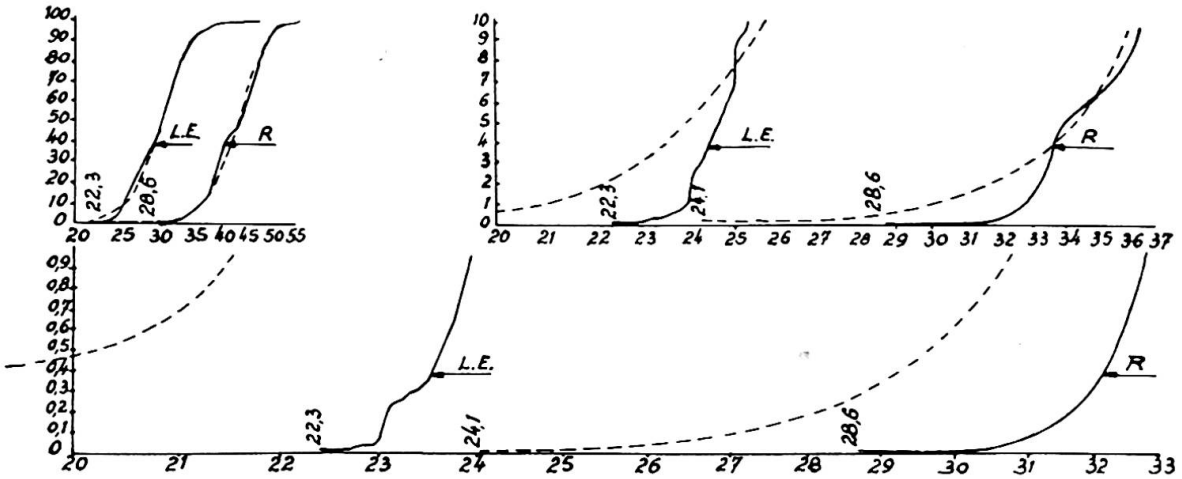


Fig. 1. Fréquence en % des résistances et limites élastiques inférieures à une valeur donnée (abscisse en kg/mm²).

les probabilités, une échelle mieux adaptée à l'examen des cas rares; avec M. Robert Lévi, prenons pour échelle fonctionnelle des probabilités cumulées, celle pour laquelle y correspond une échelle linéaire des écarts dans une répartition normale de Laplace-Gauss. Les courbes des fréquences cumulées prennent, en fonction des résistances, une forme caractéristique (fig. 2); elles tournent leur concavité du côté des résistances croissantes et semblent comporter une asymptote verticale. Le tracé de la courbe est bien assuré puisque, entre les écarts 2 et 2,6 (fréquences $2 \cdot 10^{-3}$ à 10^{-4}), 23 résultats le fixent sans ambiguïté. L'allure des courbes est si nette que l'extrapolation vers les probabilités 10^{-4} et 10^{-5} (écarts 2,6 et 3) ne soulève pas d'objection sérieuse et que même la valeur-limite de la résistance peut être évaluée. Les essais montrent ainsi :

1° Que la dispersion dans les valeurs très basses des résistances est bien moindre que celle à laquelle conduiraient les valeurs moyennes des observations extrapolées d'après une loi de dispersion de Laplace-Gauss;

2° Que, malgré leur nombre encore faible, nos résultats sont valables dans la zone où existent réellement des possibilités de ruine;

3° Qu'enfin, on peut, pour le moment, tabler, dans l'étude de la sécurité, sur une limite absolue de résistance de l'acier doux. Cette résistance-limite (environ 22 kg/mm² pour la limite élastique, 28,5 kg/mm² pour la rupture) est largement inférieure à celle que l'on considère d'ordinaire, sa valeur ne peut être déterminée pour chaque sorte d'acier que par des essais très étendus.

La figure 3 reproduit les résultats de la figure 2 en utilisant, pour les résistances, une échelle logarithmique; le graphique de gauche présente les courbes des fréquences cumulées des résistances correspondant à des allongements permanents de 2/1 000, 1/100, 2/100, et à la rupture.

Le troisième point sur lequel nous voudrions attirer l'attention est le suivant : l'importance de la dispersion des résistances mise en évidence par nos essais ne provient pas principalement de ce qu'ils ont été effectués sur des aciers de fabrication et de provenance variées. L'acier ordinaire est fortement hétérogène et présente des résistances très variables d'un point à un autre d'une section d'une même barre.

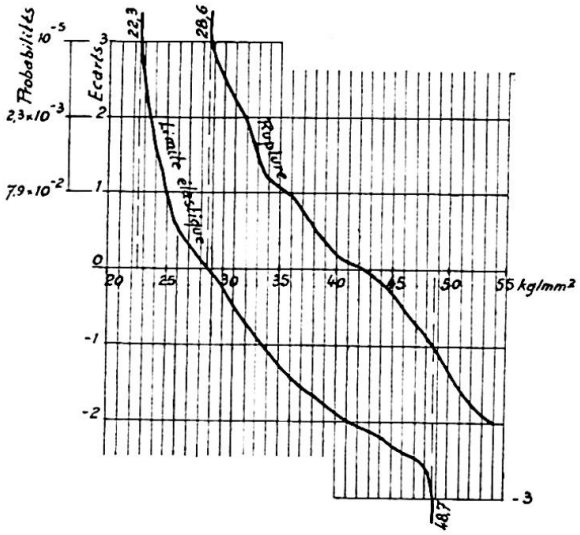
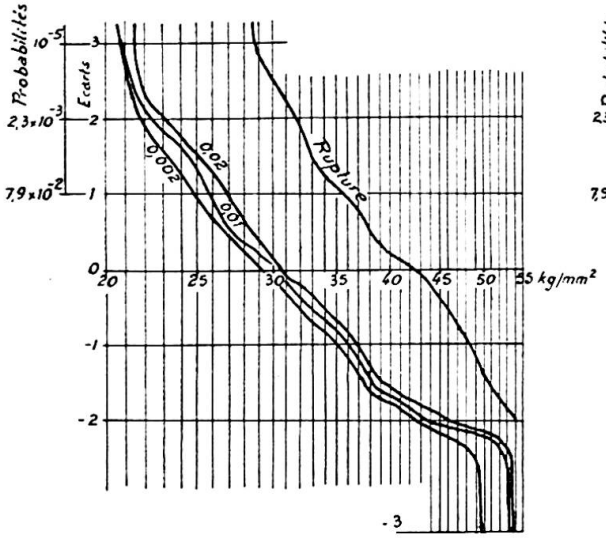
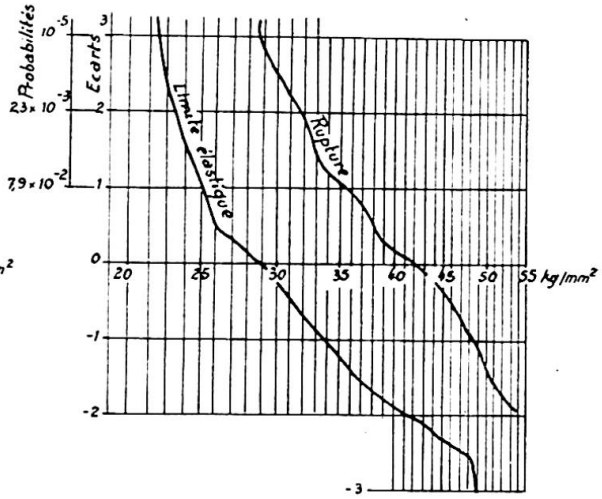


Fig. 2 (ci-contre). Fréquence des résistances et limites élastiques inférieures à une valeur donnée et écarts par rapport à la moyenne dans une courbe de Laplace-Gauss (l'échelle des fréquences correspond à une échelle linéaire pour les écarts).

Fig. 3 (ci-dessous). Courbes de la figure 2 rapportées à une échelle logarithmique pour les contraintes.





Dans un lot de tôles destinées à la reconstruction des ponts, nous en avons choisi quelques-unes sur les tranches desquelles nous avons effectué des macrographies. Nous avons retenu la meilleure, qui était saine, et nous en avons tiré 500 éprouvettes pour notre machine. On a retrouvé la dispersion des résultats constatée sur les aciers divers; les limites élastiques se situent entre 25,3 et 34,5 kg/mm², les limites de rupture entre 35,6 et 46,3 kg/mm². La dispersion ne provient pas d'erreurs expérimentales, les essais ont été soigneusement suivis, des graphiques de traction nombreux ont été relevés, qui montrent un comportement variable des diverses éprouvettes au palier et à la rupture. On constate que la position des éprouvettes influe largement sur les résistances. Dans la figure 4, les plages blanches correspondent à des résistances inférieures à 40 kg/mm², les plages noires à des résistances supérieures à 45 kg/mm².

Quelques essais de traction sur des barres d'un lot d'acier de provenance et de qualité mal connues sont donc tout à fait illusoires pour caractériser le lot. La prudence commande de ne compter que sur les résistances-limites obtenues statistiquement pour des aciers de même fabrication. Les

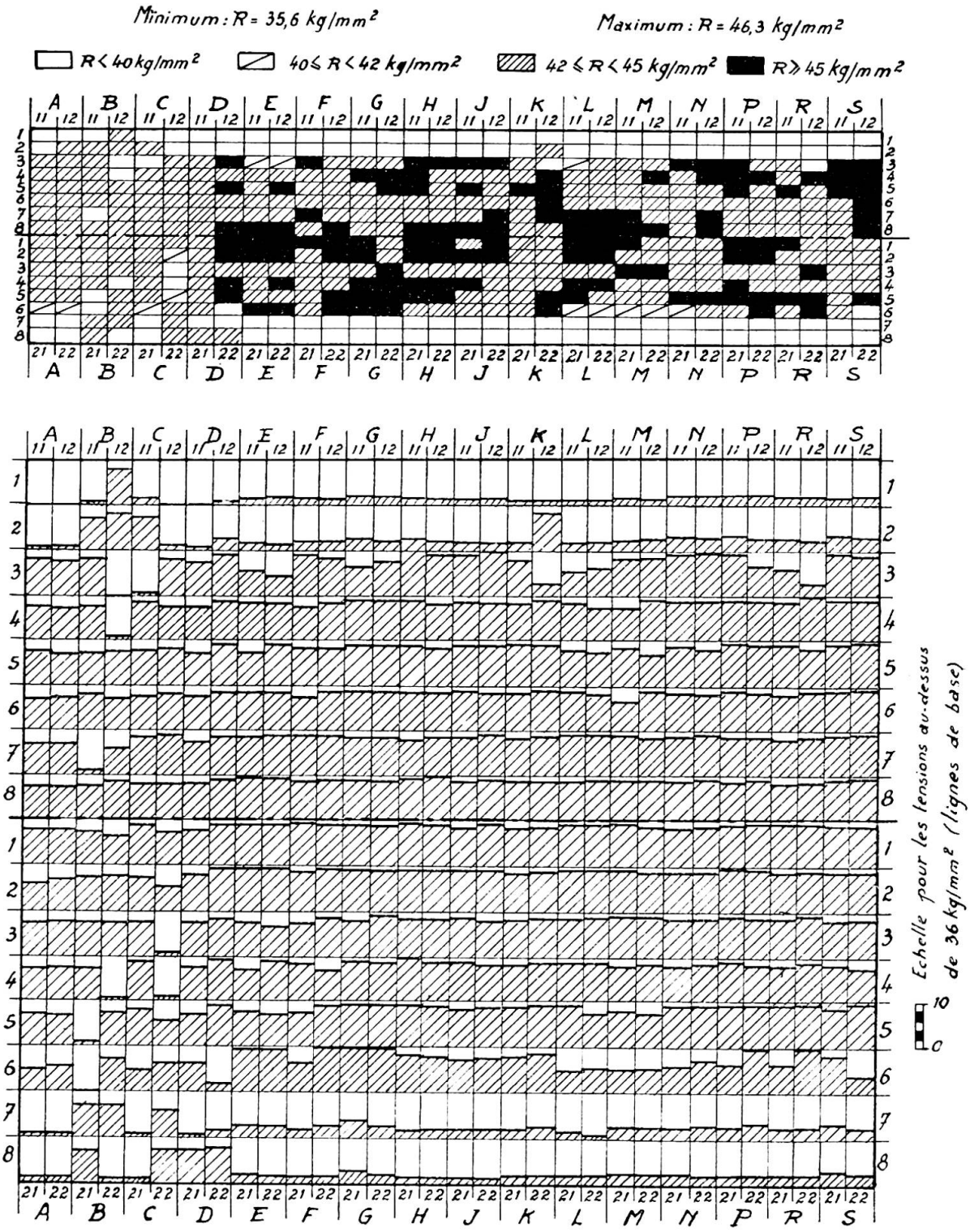


Fig. 4. Répartition des résistances à la rupture dans une même tôle.

constructions sont à dimensionner en conséquence, même si les résultats d'essais par sondages donnent des chiffres élevés, dont le groupement paraît garantir la précision.

En ce qui concerne les aciers dont la fabrication est suivie et sanctionnée par une recette, nous avons donné, dans la *Publication Préliminaire*, une courbe qui présente une allure très particulière. Il n'y a pas

analogie entre la résistance-limite à escompter pour l'acier réceptionné et celle des aciers quelconques. Toutefois, la courbe susvisée a été tracée d'après les résultats d'essais de réception effectués durant plusieurs années par des contrôleurs différents et dans diverses usines. Elle ne résulte pas d'observations systématiques des résistances anormalement basses; il serait très désirable d'effectuer des essais analogues aux nôtres pour la déterminer de façon sûre.

Des essais de même nature devraient également être entrepris sur l'acier à haute résistance pour le comparer à l'acier ordinaire et se rendre compte si, ce qui est douteux, le rapport des résistances-limites est égal à celui des résistances moyennes, comme on l'admet implicitement.

Résumé

L'auteur donne les conclusions des essais annoncés dans son mémoire *Contribution à la détermination de la courbe de dispersion des résultats d'essais sur éprouvettes d'acier doux* paru dans la *Publication Préliminaire* (page 603). Les résistances minima de l'acier doux sont bien inférieures aux valeurs considérées habituellement : on a pu les apprécier en raison de l'allure particulière de la courbe de dispersion dans la zone des faibles résistances. Il n'est pas indiqué d'adopter des valeurs plus élevées à la suite d'essais effectués sur un échantillon, car les dispersions des résultats pour les divers points d'une même tôle sont du même ordre que celles obtenues sur des éprouvettes quelconques.

Zusammenfassung

Es werden einige Schlussfolgerungen zum *Beitrag zur Bestimmung der Streuungskurve der Versuchsergebnisse von Probestücken aus Flusstahl* im *Vorbericht* (Seite 603) mitgeteilt. Die kleinsten Zugfestigkeitswerte von weichem Baustahl sind viel kleiner als die gewöhnlich angenommenen. Sie können durch die Form der Streuungskurve in dem kleinen Wertgebiet abgeschätzt werden. Grössere Werte als diejenigen von einem Probestück gemessenen sind nicht anzunehmen, da die Streuungskurve der Versuchsergebnisse von Probestücken einer selben Stahlplatte oder von verschiedenen Quellen dieselben sind.

Summary

The Author adds some conclusions to his paper *Contribution to the determining of the curve of dispersion of trial results on test pieces of mild steel* published in the *Preliminary Publication* (page 603). Minima stresses of mild steel are notably lower than those usually considered; it has been possible to estimate them owing to special outline of the dispersion curve in the zone of small resistances. It is not suitable to adopt greater values further to tests carried out on a sample because dispersion of results for various points of a same plate is of the same magnitude than that obtained on samples, taken from any part of the plate.

Leere Seite
Blank page
Page vide

V2

L'auscultation dynamique des ponts à la S. N. C. F.

(Résumé succinct)

Dynamische Untersuchungen der Eisenbahnbrücken der S. N. C. F.

(Übersicht)

Dynamic investigations on railway bridges of the S. N. C. F.

(Abstract)

M. CASSÉ

Ingénieur à la Division des Ouvrages d'Art de la S. N. C. F., Paris

Mon excuse, pour présenter au Congrès une communication sur les effets dynamiques qui vous paraîtra sans doute un peu simple, réside dans le fait que les expérimentateurs qui s'occupent de ces questions publient peu leurs résultats, tandis que ceux qui en abordent l'étude théorique regrettent de manquer de documentation. Je voudrais montrer que des observations assez faciles permettent déjà de tirer des conclusions pratiques, quand les mesures sont effectuées avec une certaine continuité de vues.

Celles dont nous dirons quelques mots se rapportent surtout à des mesures de flèches effectuées à l'aide du fleximètre optique S. N. C. F.

En adoptant une vitesse de déroulement proportionnelle aux vitesses des surcharges, les graphiques de flèches obtenus sous un même convoi présentent la même longueur; ils seraient superposables si l'effet de la vitesse était nul. Mais leur ligne moyenne est festonnée d'ondulations dont le nombre est d'autant plus faible que la vitesse est plus grande. Les graphiques ne se déduisent pas les uns des autres par amplification des ordonnées : ce qu'on appelle coefficient de majoration dynamique n'exprime pas un phénomène concret; il représente simplement le rapport de l'amplitude maximum de l'oscillation à la flèche maximum statique.

Les lignes moyennes sont-elles indépendantes de la vitesse ? Les théories répondent « non » et permettent de calculer des majorations qui dépassent facilement 1/10 pour les petits ouvrages; les actions qu'elles invoquent paraissent indéniables, notamment celle qui résulte de la force centrifuge provoquée par la courbure du tablier sous charge. Cependant, nos observations ne les confirment pas. Dans un pont de 14 mètres, nous

avons surhaussé la voie au milieu de 6 fois la flèche statique, nous l'avons ensuite abaissée de 12 fois la flèche statique; l'effet de courbure s'est montré inappréciable sur nos graphiques, même à la vitesse de 120 kmh. Le maximum de majoration des ordonnées de la courbe moyenne que nous ayons relevé dans l'ensemble de nos essais, est de 3 %. Au point de vue pratique, il est donc inutile, sur un tablier, de poser la voie en dos d'âne, comme on le recommande quelquefois.

Quelle est l'importance des oscillations secondaires ? Les forces périodiques provenant du mouvement du mécanisme des locomotives paraissent seules susceptibles de provoquer des oscillations importantes. Nous avons effectivement reconnu que l'on obtenait, avec certaines machines présentant un hammerblow notable, des oscillations sensibles et régulières s'amplifiant à des vitesses critiques. Des machines quasi identiques mais sans hammerblow avoué déterminaient des effets analogues mais nettement moins élevés. Les oscillations maxima relevées ne nous donnent cependant qu'une majoration de 16 %, qui ne correspond encore qu'aux 2/3 de celle que l'on peut calculer en tenant compte dans le détail des forces périodiques se déplaçant sur l'ouvrage et du coefficient d'amortissement effectivement observé.

Les oscillations verticales cumulatives nous paraissent ainsi demeurer modérées. C'est seulement dans des cas-limites qu'on peut avoir des raisons d'imposer des restrictions particulières à la circulation, sur les ponts, de machines dont le hammerblow est défavorable.

Les calculs de majoration dynamique ne peuvent être effectués correctement que si l'on y introduit l'amortissement réel. Quel est cet amortissement ? Les graphiques permettent de l'apprécier pour les oscillations libres : le décrément est généralement compris entre 1,04 et 1,12. Il varie pour un même ouvrage avec l'amplitude et la période des oscillations primaires et secondaires.

Nous n'avons pas observé de différence caractéristique entre l'amortissement relatif aux tabliers métalliques rivés, aux tabliers soudés et aux tabliers en béton armé.

Le ballast n'a aucun effet favorable, contrairement à une opinion assez répandue.

L'emploi de plaques de caoutchouc, tant sur les appuis que comme intermédiaire entre voie et tablier, provoque, au contraire un amortissement considérable qui étouffe les oscillations cumulatives; le tablier, qu'il soit en métal ou en béton armé, est pratiquement exempt de vibrations.

Nous ne donnerons pas d'autres observations générales; la mesure systématique de flèches confirme que les effets d'ensemble auxquels donnent lieu les charges dynamiques demeurent pratiquement très modérés. Les effets notables ne se rencontrent que localement et dans certaines pièces. C'est par des mesures locales (contraintes et peut-être accélérations) qu'il convient de les étudier. La S. N. C. F. élabore actuellement un programme de mesures dans ce sens.

D'autre part, nous voudrions signaler l'intérêt des mesures d'oscillations horizontales, peu étudiées jusqu'ici. Les amplitudes importantes que nous avons obtenues avec le rouligraphe S. N. C. F. conduisent à se soucier de l'effet de ces oscillations, non seulement sur les contraintes du matériau, mais aussi sur la tenue de la voie de roulement. Sous un train se déplaçant à 50 km/h sur un tablier de 60 mètres de portée, il a été

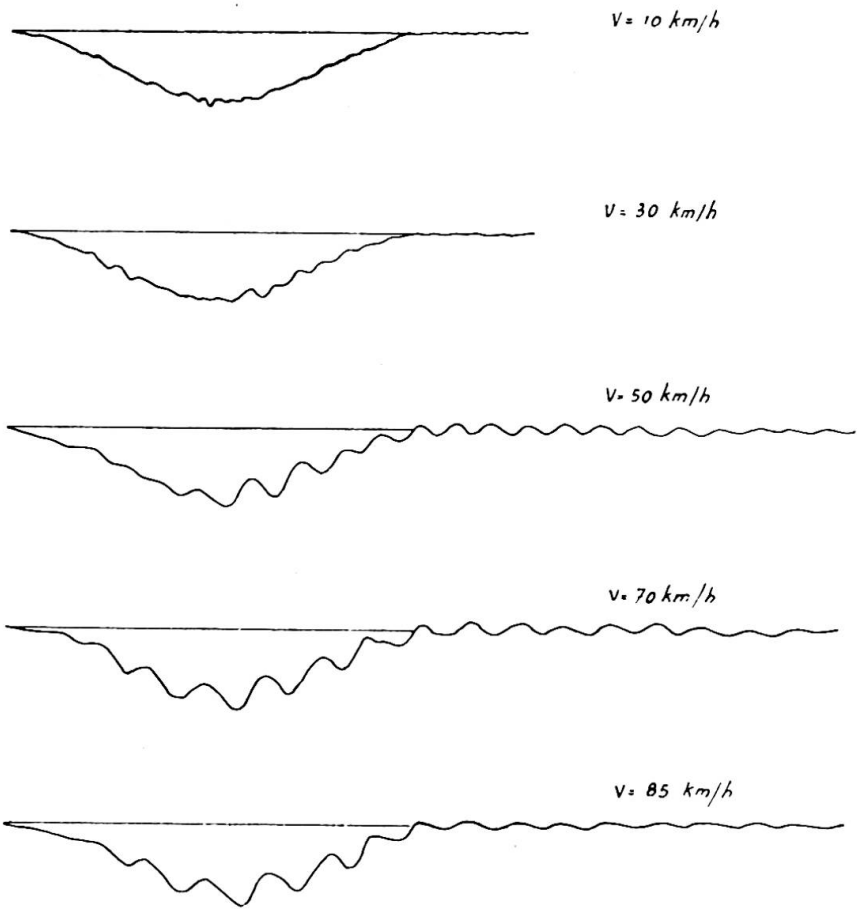


Fig. 1. Enregistrement des flèches pour des vitesses comprises entre 10 et 85 km/h.

relevé des déplacements transversaux de $\pm$ 12,5 mm avec une période de 6/10 seconde. En gros, la voie se présente sur l'ouvrage comme un chemin présentant, tous les 8^{m},30, des sinuosités de 25 millimètres d'amplitude totale. Un relèvement de la vitesse dans ces conditions demande réflexion. Des mesures analogues permettent de se rendre compte de la stabilité réelle de piles très hautes supportant des tabliers soumis à des oscillations horizontales transversales et longitudinales résultant des mouvements transversaux des véhicules et des freinages brusques. Nous nous proposons d'effectuer une étude systématique de ces déplacements transversaux.

Résumé

L'auteur donne les conclusions pratiques qui résultent d'essais effectués avec les appareils mentionnés dans son mémoire *L'auscultation dynamique des ponts à la S. N. C. F.* paru dans la *Publication Préliminaire* (page 651). L'augmentation de la vitesse des convois ne provoque pas de majoration importante des flèches des ponts. Elle peut cependant déterminer des effets locaux ou des mouvements transversaux gênants dans des ouvrages particuliers.

Zusammenfassung

Es werden einige praktische Schlussfolgerungen zum Beitrag *Dynamische Untersuchungen der Brücken der S. N. C. F.* des *Vorberichtes*

(Seite 651) mitgeteilt. Die Vergrösserung der Geschwindigkeit der Züge hat einen kleinen Einfluss auf die Durchbiegung der Brücken. Dennoch kann sie örtliche Wirkung oder Querbewegungen in bestimmten Fällen mit sich bringen.

Summary

The Author gives practical conclusions resulting from tests carried out with apparatus mentioned in his paper *Dynamic research of bridges of the S. N. C. F.*, published in the *Preliminary Publication* (p. 651). The increase of trains' speed does not provoke any important increase in bridge deflection, but may be able do determine local effects or transverse movements, which are inconvenient in special cases.

V3

Essais statistiques sur mortiers et bétons

Statistische Versuche über Mörtel und Beton

Statistic tests on mortar and concrete

Marcel PROT
Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
Docteur ès Sciences
Docteur ès Lettres
Paris

1 – Introduction

1.1 — *But des essais*

Nous avons, dans notre rapport introductif sur la sécurité des constructions, indiqué quels paraissaient être les moyens de substituer un coefficient de sécurité rationnel au coefficient de sécurité empirique ordinairement adopté dans les techniques de construction des ouvrages de génie civil exposés à une ruine due à des sollicitations mécaniques excessives (1).

Nous avons indiqué, notamment, quelles précautions il convenait de prendre pour prévoir la résistance d'un élément d'ouvrage à l'aide des résultats obtenus par des essais sur éprouvettes. Rappelons brièvement ces diverses précautions.

a) Une pièce ne se rompt pas sous l'action d'une contrainte, mais sous l'action d'un champ de contraintes défini en chaque point par trois contraintes principales et les résultats d'essais sur éprouvettes ne peuvent être utilisés pour estimer la résistance d'un élément d'ouvrage que si le champ de contraintes est du même type dans les deux cas.

b) La loi de probabilité de ruine d'un élément d'ouvrage ne peut pas se déduire directement de la loi de fréquence de rupture observée sur des éprouvettes qui n'ont pas les mêmes formes et les mêmes dimensions que l'élément considéré, même si toutes les conditions sont remplies pour une comparaison qualitative correcte, en raison, notamment, de l'effet de paroi.

c) Il va de soi, par ailleurs, que la déduction ne peut être valable que dans la mesure où l'élément d'ouvrage considéré, d'une part, et les éprouvettes, d'autre part, sont bien constitués du même matériau.

---

(1) Marcel Prot, *La sécurité des constructions. Rapport introductif* (*Publication Préliminaire du troisième Congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes*, Liège, 1948, p. 571).

Le but des essais dont les résultats sont exposés dans le présent rapport était d'appliquer ces vues théoriques générales au cas particulier des essais sur éprouvettes de ciment et d'étudier comment il était possible de déduire rationnellement de tels essais la probabilité de bonne tenue d'un ouvrage construit avec le même ciment.

1.2 — *Programme des essais*

1.21 — Sollicitation.

Le programme des essais ne comporte que des essais de compression. Il doit donc être entendu que les résultats obtenus ne pourraient être utilisés que pour l'estimation de la résistance d'un élément d'ouvrage travaillant à la compression simple de telle façon qu'en tous les points de cet élément le champ de contraintes soit défini par une contrainte principale de compression, les deux autres contraintes principales étant nulles.

Les essais étant des essais de compression statique, les résultats ne pourraient en être utilisés pour l'estimation de la résistance d'un élément d'ouvrage soumis à des compressions percussives ou à des compressions répétées susceptibles de provoquer des phénomènes de fatigue.

1.22 — Forme des éprouvettes.

Les essais ont été effectués exclusivement sur des éprouvettes parallélipipédiques de section carrée et dont la hauteur a varié, suivant les types, de trois à six fois le côté de la section transversale. Les résultats de ces essais ne pourraient donc être utilisés pour prévoir la résistance d'un élément d'ouvrage qu'avec des réserves croissantes lorsque la forme de cet élément s'écarterait de la forme des éprouvettes; ce serait le cas pour une forme très massive se rapprochant d'un cube et dans laquelle les plans de rupture ne pourraient plus déboucher sur les faces latérales du prisme; ce serait également le cas pour une forme très élancée qui serait exposée à flamber.

1.23 — Dimensions des éprouvettes.

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de dimensions différentes dans le but de mettre en évidence l'influence de ces dimensions sur la valeur moyenne et sur la dispersion des résultats obtenus. Trois types d'éprouvettes parallélipipédiques sensiblement homothétiques ont été utilisés, le rapport d'homothétie du deuxième au premier et du troisième au deuxième étant voisin de $\sqrt{5}$. Un autre type d'éprouvette a été utilisé présentant la même section droite mais une longueur deux fois plus grande que le deuxième type précédent.

1.24 — Nombre des éprouvettes.

Les essais ont été effectués en nombre suffisant pour donner une valeur précise de la valeur moyenne et de la dispersion des caractéristiques mesurées; le nombre des éprouvettes les plus petites, en particulier, a été voisin d'un millier (40 séries de 24 éprouvettes = 960 éprouvettes).

1.25 — Nature des matériaux.

Les essais ont été effectués, d'une part, sur un mortier (agrégat à 2 grains), d'autre part, sur un béton (agrégat à 3 grains); cette double étude avait pour objet d'indiquer dans quelle mesure on peut utiliser les

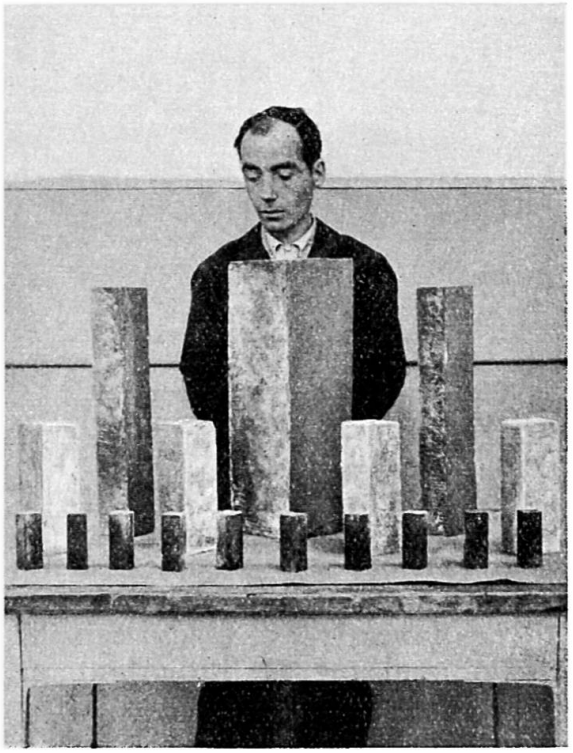


Fig. 1 et **2.** Eprouvettes. Dimensions des 4 types utilisés.

Référence du type d'éprouvette	1	2	3	4
Arête de la section carrée en cm . .	3,16	7,08	7,08	15,8
Section, en cm²	10	50	50	250
Hauteur, en cm	9	22,3	45	50
Volume en cm³	90	1.115	2.250	12.500

résultats d'essais sur mortier pour prévoir la résistance d'un béton, l'un et l'autre étant faits, bien entendu, avec le même ciment.

Des précautions toutes particulières ont été prises pour que les conditions de fabrication, de conservation et d'essai des éprouvettes soient aussi bien définies et aussi constantes que possible. Les résultats qui seront exposés plus loin montreront que le succès de ces précautions a été incomplet et l'expérimentation a particulièrement souligné l'importance de l'observation théorique rappelée plus haut en 1.1 *c*.

2 – Essais sur éprouvettes de mortier

2.1 — *Description des éprouvettes*

Les éprouvettes utilisées pour les essais de mortier ont toutes présenté la forme de parallélipipèdes rectangles; elles ont été de quatre types dont

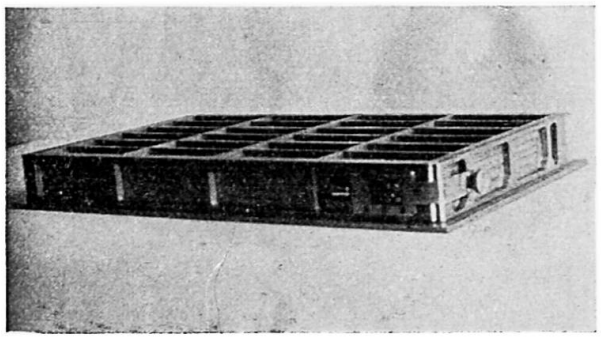


Fig. 3. Moule pour éprouvettes type n° 1, sans son couvercle.

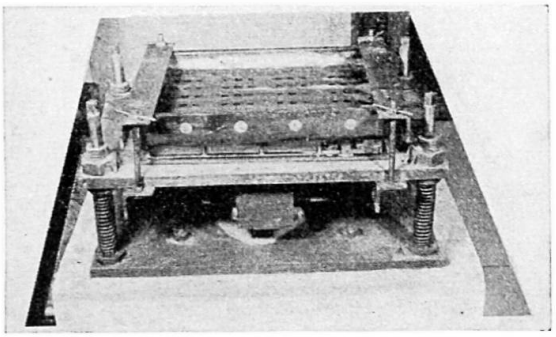


Fig. 4. Moule pour éprouvettes type n° 1, avec son couvercle, monté sur la table vibrante.

les dimensions sont résumées dans le tableau n° 2. La figure 1 montre la réalisation de ces différentes éprouvettes.

Les types 1, 2 et 4 sont sensiblement homothétiques. Le type 1 a déjà fait l'objet d'une très importante expérimentation ([2]); le type 3 a la même section que le type 2 mais sa hauteur est double. Les types 2 et 3 ont une section cinq fois plus grande que le type 1 et le type 4 a une section vingt-cinq fois plus grande que le type 1.

2.2 — *Fabrication des éprouvettes*

2.21 — Moules.

Les moules utilisés pour la fabrication des éprouvettes sont des moules métalliques dont on a assuré l'étanchéité pour éviter toute perte

([2]) Marcel PROT, *Recherches sur les essais de ciments. Etudes d'un nouveau type d'éprouvette susceptible de convenir à divers essais.* Circulaires F n° 35 (janvier 1947) et F n° 36 (avril 1947) de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris.
Louis VIRONNAUD, *Essais mécaniques sur un nouveau type d'éprouvette en mortier de ciment* (*Annales des Ponts et Chaussées*, 118e année, n° 2, mars-avril 1948).

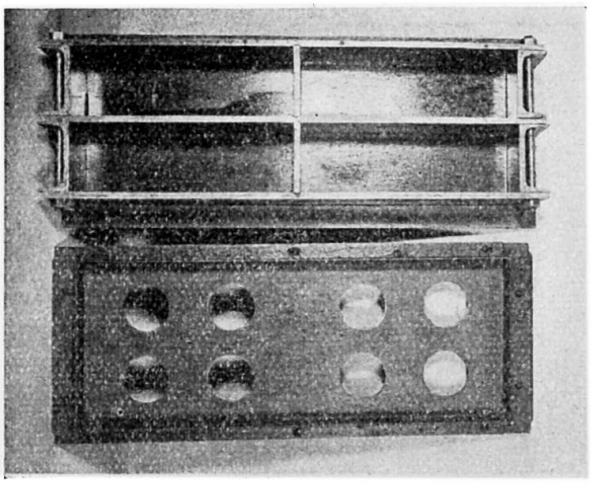


Fig. 5. Moule pour éprouvettes type n° 2, avec son couvercle.

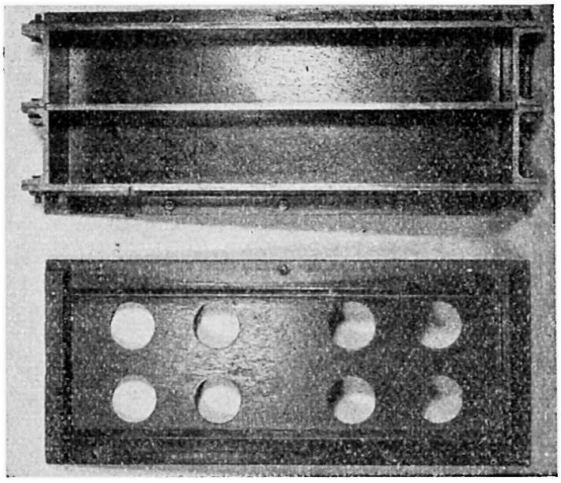


Fig. 6. Moule pour éprouvettes type n° 3, avec son couvercle.

de laitance au cours de la vibration et que l'on a fermés à l'aide d'un couvercle pour éviter toute perte d'eau par évaporation.

2.211 — Moule pour éprouvette type n° 1.

Le moule utilisé pour la fabrication du type d'éprouvette n° 1 permet la fabrication simultanée de 24 éprouvettes correspondant à une gâchée d'environ 5,5 kg de mortier. Les photographies de la figure 3 et de la figure 4 représentent ce moule, qui a déjà servi à la fabrication de plusieurs milliers d'éprouvettes, ainsi que son montage sur la table vibrante. L'étanchéité est assurée par un mastic spécial.

2.212 — Moule pour éprouvette type n° 2.

Le moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes du type n° 2 est représenté par la photographie de la figure 5; il permet la fabrication simultanée de 4 éprouvettes correspondant à une gâchée d'environ 12 kg de mortier. Les tôles de ce moule ont 7 mm d'épaisseur.

2.213 — Moule pour éprouvette type n° 3.

Le moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes du type n° 3 est représenté par la photographie de la figure 6; il est identique au précédent à ceci près qu'il ne comporte pas de cloisons transversales; il permet de faire deux éprouvettes avec une gâchée de 12 kg environ.

2.214 — Moule pour éprouvette type n° 4.

Le moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes du type n° 4 permet de fabriquer une éprouvette avec une gâchée d'environ 30 kg. Ce moule, comme les précédents, est rendu étanche par masticage.

2.22 — Matériaux.

2.221 — Ciment.

Le ciment utilisé était du Portland artificiel Lafarge de la classe 250/315. La quantité de ciment nécessaire à l'ensemble des essais a été prélevée sur une même fourniture et mise dans des récipients métalliques soudés aussitôt après remplissage.

2.222 — Sable.

Le sable utilisé était du sable de Seine lavé et tamisé sur tamis vibrants inclinés.

Le sable fin passe à travers des trous de 0,5 mm et est retenu par des trous de 0,4 mm.

Le sable gros passe à travers des trous de 3 mm et est retenu par des trous de 2 mm.

2.223 — Eau.

L'eau utilisée était celle de la distribution urbaine.

2.23 — Composition du mortier.

La composition du mortier est, en poids :

1 de ciment,
1 de sable fin,
2 de sable gros.

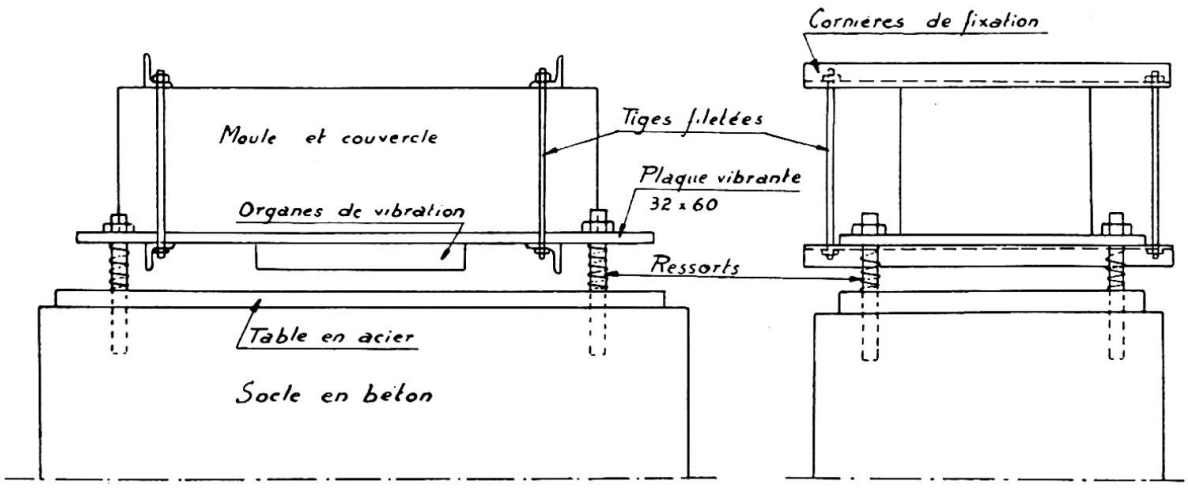


Fig. 7. Fixation des moules sur la table vibrante.

La quantité d'eau est déterminée de telle façon que le rapport en poids

$$\frac{\text{ciment}}{\text{eau}} = \frac{C}{E} = 2{,}315 \ .$$

2.24 — Fabrication du mortier.

Les éléments du mortier sont mélangés dans une salle du sous-sol du laboratoire dont la température, constante à 1 degré près, est de 19 degrés.

Le gâchage se fait à la truelle, sur une table en acier inoxydable, pour les éprouvettes du type n° 1; il se fait à la pelle, sur une aire métallique pour les autres éprouvettes. La durée du gâchage est de 5 minutes.

Le malaxage a été effectué, dans des conditions aussi identiques que possible, par le même opérateur pendant toute la durée des essais.

2.25 — Remplissage des moules.

Le mortier est placé et tassé dans les moules par vibration à l'aide d'une table vibrante animée de vibrations verticales produites par des masses excentrées.

La fréquence des vibrations, assez bien définie, était d'environ 4 300 cycles/minute; l'amplitude des vibrations a été beaucoup plus mal définie et assez différente d'un type d'éprouvette à un autre, la charge de la table ayant varié, selon les cas, dans des proportions notables.

Le croquis de la figure 7 et la photographie de la figure 4 montrent le dispositif de fixation des moules sur la table vibrante.

La fixation du moule étant assurée et le mortier étant gâché, la table vibrante est mise en mouvement. L'opérateur dépose alors le mortier à la truelle sur le couvercle du moule; sous l'influence des vibrations, le mortier pénètre dans le moule par les trous du couvercle. On perçoit aisément la fin du remplissage; le mortier ne pénètre plus et un peu de laitance se forme à la surface des trous.

La durée de vibration a été fixée à :

6 minutes pour les 24 éprouvettes du type n° 1 (volume total 2 160 cm³);
2 minutes pour les 4 éprouvettes du type n° 2 (volume total 4 800 cm³);
2 minutes pour les 2 éprouvettes du type n° 3 (volume total 4 800 cm³);
4 minutes pour l'éprouvette du type n° 4 (volume total 12 900 cm³).

La vibration ainsi pratiquée n'assure cependant pas un remplissage absolument parfait, le couvercle à trous est enlevé, une finition est effectuée à la truelle et un couvercle plein est alors placé sur le moule qui se trouve, de la sorte, complètement clos.

2.3 — *Conservation des éprouvettes*

Les éprouvettes restent dans le moule clos pendant 22 heures puis elles sont démoulées et restent à l'air, dans le sous-sol du laboratoire, pendant environ 2 heures, après quoi, c'est-à-dire à 24 heures d'âge, elles sont soigneusement immergées dans des bacs remplis d'eau de la distribution urbaine. L'eau de conservation des éprouvettes est renouvelée chaque semaine.

Les éprouvettes sont sorties de l'eau le quatorzième jour, pendant environ une heure, pour être mesurées et pesées.

Les essais ont lieu à 28 jours après la fabrication. Les petites éprouvettes (type n° 1) sont transportées dans une cuvette pleine d'eau du sous-sol jusqu'à la salle des presses et rompues dès leur sortie de l'eau; les autres éprouvettes, plus volumineuses et plus lourdes, ne sont pas transportées dans l'eau, elles s'égouttent et se sèchent ainsi quelque peu pendant une durée qui peut atteindre une heure.

2.4 — *Mesures et essais sur les éprouvettes n° 1*

Toutes les éprouvettes sont mesurées et pesées à 14 jours et rompues par compression à 28 jours.

2.41 — Techniques de mesure et d'essai.

2.411 — Mesures géométriques

La mesure des trois dimensions de chaque éprouvette se fait à l'aide d'un marbre et d'un comparateur au 1/100 mm selon le dispositif représenté par la figure 8. Dix mesures sont faites pour chacune des petites dimensions et cinq mesures sont faites pour la grande selon les points d'un quadrillage régulier; la moyenne de ces groupes de mesures définit la dimension correspondante. Chaque lecture étant faite à 1/100 mm près, les petites dimensions sont définies avec une approximation voisine de 1/3 000 et la grande dimension est définie avec une approximation voisine de 1/9 000. Les écarts observés sont très supérieurs à ces approximations

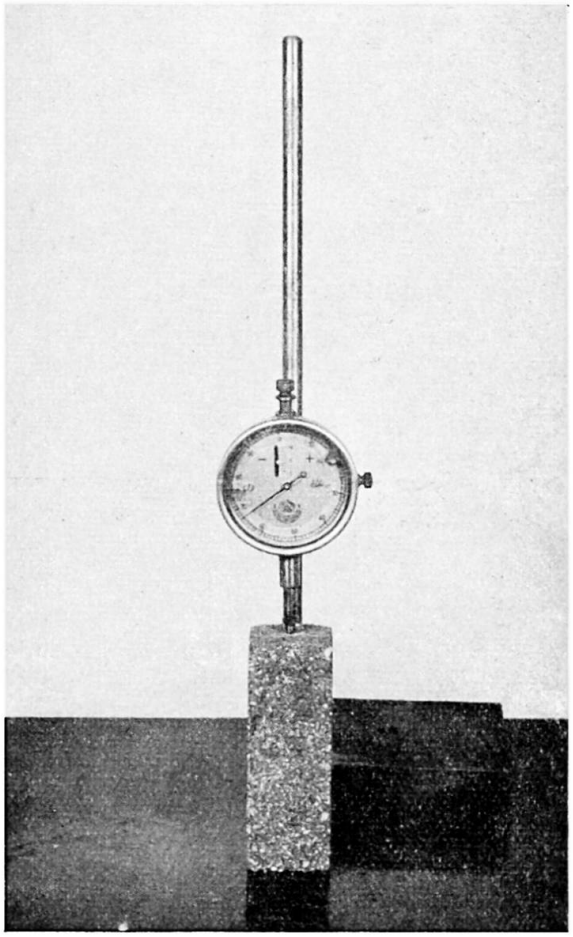


Fig. 8. Dispositif pour la mesure des dimensions des éprouvettes.

et résultent des imperfections du moule, imperfections dues à la construction ou à l'usure.

2.412 — Pesées.

Les éprouvettes sont pesées au moment où l'on mesure leurs dimensions, après un égouttage de 30 minutes; la précision des pesées est de 0,1 g. Le poids de chaque éprouvette est donc connu avec une approximation voisine de 1/2 000. La densité, calculée par le rapport P/V est

Numéro de la série	Densité (Moyenne)	Ecart moyen		Ecart maximum	
		Absolu	Relatif (en %)	Absolu	Relatif (en %)
1	2,325	0,0072	0,31	0,021	0,90
2	2,317	0,0070	0,30	0,014	0,60
3	2,321	0,0063	0,27	0,015	0,64
4	2,316	0,0068	0,29	0,018	0,77
5	2,328	0,0065	0,28	0,017	0,73
6	2,331	0,0056	0,21	0,016	0,68
7	2,329	0,0042	0,18	0,013	0,48
8	2,329	0,0040	0,17	0,010	0,42
9	2,322	0,0064	0,28	0,016	0,69
10	2,333	0,0093*	0,39*	0,029*	1,25*
11	2,334	0,0045	0,19	0,019	0,81
12	2,328	0,0069	0,30	0,020	0,85
13	2,330	0,0085	0,36	0,020	0,86
14	2,321	0,0051	0,22	0,014	0,61
15	2,328	0,0053	0,23	0,015	0,64
16	2,320	0,0060	0,26	0,019	0,82
17	2,325	0,0065	0,28	0,015	0,65
18	2,329	0,0051	0,22	0,012	0,52
19	2,322	0,0080	0,34	0,021	0,94
20	2,325	0,0036	0,16	0,021	0,90
21	2,324	0,0045	0,19	0,013	0,56
22	2,342*	0,0038	0,17	0,012	0,51
23	2,319	0,0055	0,24	0,015	0,65
24	2,324	0,0033*	0,14*	0,009*	0,39*
25	2,325	0,0066	0,26	0,019	0,82
26	2,316	0,0048	0,21	0,012	0,52
27	2,330	0,0046	0,20	0,011	0,47
28	2,332	0,0069	0,30	0,021	0,90
29	2,331	0,0063	0,27	0,017	0,73
30	2,305*	0,0073	0,32	0,019	0,82
31	2,328	0,0053	0,23	0,013	0,56
32	2,322	0,0082	0,35	0,017	0,73
33	2,333	0,0052	0,22	0,013	0,56
34	2,328	0,0061	0,26	0,012	0,52
35	2,326	0,0060	0,26	0,014	0,60
36	2,332	0,0063	0,27	0,019	0,71
37	2,318	0,0049	0,21	0,012	0,52
38	2,336	0,0055	0,24	0,011	0,47
39	2,318	0,0055	0,24	0,018	0,84
40	2,314	0,0075	0,32	0,014	0,61
Moyennes :	2,325	0,0058	0,25	0,016	0,68

* Valeurs extrêmes (maximum et minimum).

FIG. 9. DENSITÉS. *Tableau des résultats sur 40 séries d'éprouvettes type n° 1.*

affectée, du fait des techniques de mesures et de pesées, d'une incertitude relative de l'ordre de 1,5/1 000.

2.413 — Essais de compression.

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression à l'aide d'une presse Amsler de 20 tonnes dont les plateaux ne comportent pas de rotule. La compression s'exerce dans le sens de la plus grande dimension de l'éprouvette; des cartons de 1,8 mm d'épaisseur sont interposés entre les faces terminales de l'éprouvette et les plateaux de la presse. La vitesse de croissance de la pression est toujours la même. La précision de la mesure de la contrainte de rupture est d'environ 0,5/100.

La photographie de la figure 13 qui représente une série de 24 éprouvettes rompues montre que les ruptures sont toutes correctes.

Sur les 960 éprouvettes fabriquées (40 séries de 24), 7 éprouvettes seulement ont été détériorées au cours des démoulages et des diverses manipulations, ce qui a ramené à 953 le nombre des résultats effectivement enregistrés.

2.42 — Résultats.

2.421 — Densités.

L'ensemble des résultats obtenus par mesures de dimensions et pesées sur les 953 éprouvettes du type n° 1 ont permis de calculer les densités résumées dans le tableau n° 9 et par la courbe de la figure 10. Ces résultats sont, par ailleurs, reportés dans les tableaux récapitulatifs n° 29 et 30 qui permettent de comparer les résultats obtenus sur les éprouvettes du type n° 1 avec les résultats obtenus sur les autres types d'éprouvettes.

Le tableau n° 9 donne, pour chaque série de 24 éprouvettes :

— La moyenne arithmétique des 24 densités;

— L'écart moyen et l'écart maximum, en valeur absolue et en valeur relative, que présentent les différentes densités d'une série par rapport à la moyenne de la série.

La dernière ligne du tableau n° 9 donne, en outre, la moyenne arithmétique des densités moyennes des 40 séries et la moyenne arithmétique des différents écarts de chaque série.

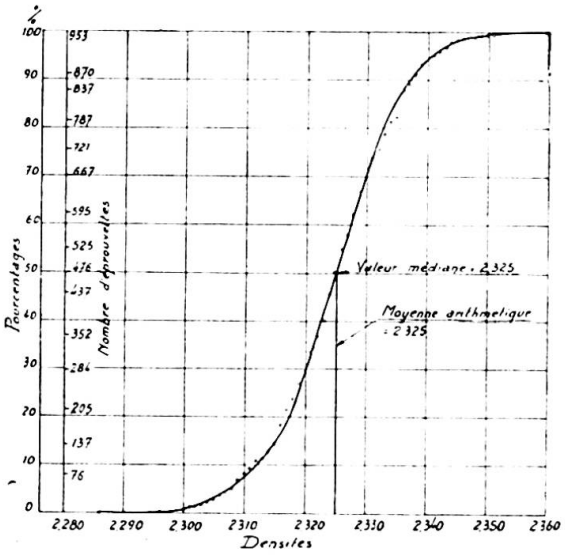


Fig. 10. Eprouvettes type n° 1 - Mortier. Courbe des fréquences cumulées des densités.

Numéro de la série	Contrainte de rupture (moyenne)	Ecart moyen		Ecart maximum			
				Positif		Négatif	
		Absolu	Relatif (en %)	Absolu	Relatif (en %)	Absolu	Relatif (en %)
	k/cm²	k/cm²		k/cm²		k/cm²	
1	420	25	6,0	56	13,3	59	14
2	430	42	9,8	72	16,7	135	30,7
3	419	31	7,4	72	17,3	83	19,8
4	419	21	5,0	66	15,7	102	24,3
5	430	24	5,6	54	12,1	75	17,4
6	456	32	7,0	53	11,6	80	17,6
7	457	27	5,9	58	12,7	123	26,9
8	425	25	5,8	51	12,0	81	19,1
9	428	27	6,3	57	13,4	84	19,6
10	450	26	5,8	41	9,1	85	18,9
11	434	27	6,2	58	13,4	74	17,1
12	463*	28	6,0	52	11,2	107	23,1
13	419	25	6,0	42	10,0	72	17,2
14	425	24	5,6	43	10,1	71	16,7
15	436	21	4,8	50	11,5—	——50	11,5
16	409	9*	2,0*	51	12,5—	——36*	8,8*
17	430	32	7,4	57	13,3	64	14,9
18	430	27	6,3	73	17,0—	——60	14,0
19	417	29	7,0	74	17,7—	——61	14,6
20	423	36	8,5	70	16,5	118	27,9
21	437	26	5,9	51	11,8	60	13,7
22	427	30	7,0	47	11,0	77	18,0
23	409	27	6,6	74	18,1	78	19,0
24	392*	26	6,6	46	11,7	90	23,0
25	444	41	9,2	64	14,4	79	17,8
26	411	23	5,6	56	13,6	115	28,0
27	440	27	6,1	44	10,0	73	16,6
28	459	32	7,0	73	15,9—	——66	14,4
29	457	22	4,8	40	8,8*	47	10,3
30	444	22	5,0	59	13,3	103	23,2
31	432	24	5,6	87*	20,1*	90	20,8
32	422	21	5,0	50	11,8	72	17,1
33	442	23	5,2	54	12,2—	——47	10,6
34	450	35	7,8	60	13,3	94	20,9
35	410	24	5,9	64	15,6—	——55	13,4
36	424	20	4,7	39*	9,2	51	12,0
37	400	47*	11,8*	80	20,0	167*	41,8*
38	455	34	7,5	65	14,3	115	25,3
39	416	28	6,7	63	15,1	67	16,1
40	423	28	6,6	40	9,5	73	17,3
Moyennes :	430	27	6,4	58	13,2	81	19,5

* Valeurs extrêmes.
——— L'écart positif est plus grand que l'écart négatif.

FIG. 11. CONTRAINTES DE RUPTURE.

Tableau des résultats des essais de compression sur 40 séries d'éprouvettes du type n° 1.

Dans le tableau n° 30 on a désigné par écart positif l'écart correspondant à une éprouvette dont le poids est supérieur à la moyenne et par écart négatif l'écart correspondant à une éprouvette dont le poids est inférieur à la moyenne.

La figure 10 représente la courbe des fréquences cumulées des diverses densités observées; on a porté, en abscisses les valeurs de la densité et en ordonnées le nombre d'éprouvettes dont la densité est inférieure à la valeur de l'abscisse correspondante; les deux échelles sont linéaires. Cette courbe présente une très bonne régularité.

2.422 — Contraintes de rupture.

Le tableau n° 11 et la courbe de la figure 12 résument les résultats des essais de compression effectués sur les 40 séries d'éprouvettes du type n° 1.

La contrainte de rupture est déterminée, pour chaque éprouvette, en divisant la force indiquée par la machine par la section réelle de l'éprouvette telle qu'elle résulte des mesures effectuées sur cette éprouvette.

Le tableau n° 11 indique, pour chaque série de 24 éprouvettes, la moyenne arithmétique et, en valeur absolue et en valeur relative, l'écart moyen, l'écart maximum positif et l'écart maximum négatif. La dernière ligne du tableau indique les moyennes pour l'ensemble des 40 séries.

La courbe de répartition de la figure 12 fait apparaître une très remarquable régularité mais aussi — il importe de le noter — un dyssymétrie marquée qui ressort également du tableau n° 11.

Le tableau n° 11 montre que, sur les 40 séries, 7 séries seulement accusent un écart maximum positif supérieur (de très peu d'ailleurs) à l'écart maximum négatif. Pour l'ensemble des éprouvettes essayées, l'écart maximum négatif, qui atteint 46 %, est le double de l'écart maximum positif qui n'atteint, lui, que 23 % ; le rapport entre la valeur maximum et la valeur minimum de la contrainte de rupture est voisin de 2.

2.5 — *Mesures et essais sur les éprouvettes n° 2*

Toutes les éprouvettes du type n° 2 ont été, comme les éprouvettes du type n° 1, mesurées et pesées à 14 jours d'âge et essayées à la compression

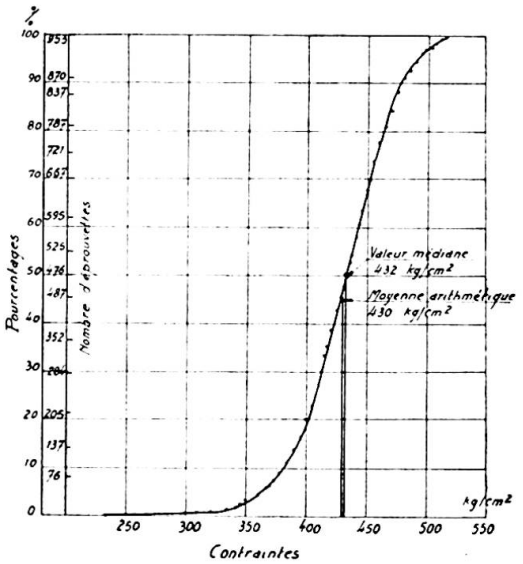


Fig. 12. Eprouvettes type n° 1 - Mortier. Fréquences annulées des contraintes de rupture par compression.

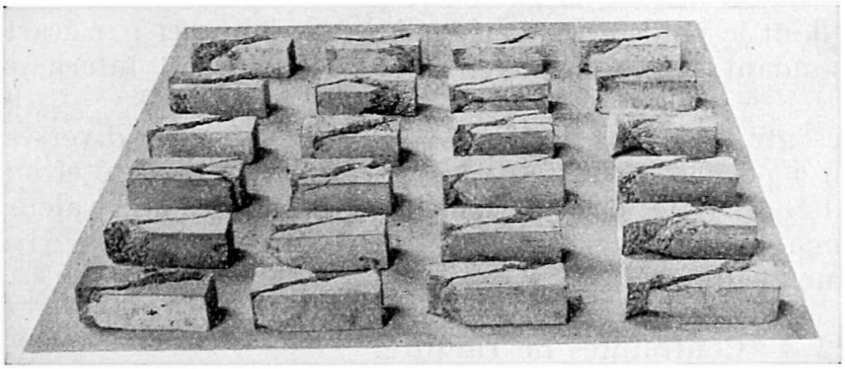


Fig. 13.

à 28 jours. Les essais ont porté sur 40 séries de 4 éprouvettes, soit sur 160 éprouvettes au total.

2.51 — Techniques de mesure et d'essai.

2.511 — Mesures géométriques.

La mesure des trois dimensions de chaque éprouvette est faite à l'aide d'un pied à coulisse permettant des lectures au 1/10 mm ; cinq mesures sont faites pour chaque dimension; la précision des mesures est à peu près de 1,4/1 000 pour les petites dimensions et de 0,5/1 000 pour la grande dimension; le volume est donc connu à 0,33 % près.

Le moule n'a pas été réalisé avec une très bonne précision et l'on relève entre les dimensions réelles et les dimensions nominales des écarts notables, sans grande importance pratique d'ailleurs puisqu'on a dans tous les cas tenu compte des dimensions réelles des éprouvettes.

Les écarts des mesures géométriques par rapport à la moyenne varient de 0,3 % à 0,7 % en moyenne et atteignent au maximum 2 %.

Le tableau n° 29 résume les mesures faites.

2.512 — Pesées.

Les éprouvettes sont pesées après avoir été mesurées, soit après un égouttage d'environ 30 minutes, sur une balance permettant des lectures à 1 g près, soit pour un poids voisin de 2,700 kg une précision 0,4/1 000.

2.513 — Essais de compression.

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression à l'aide d'une presse Amsler de 500 tonnes à la sensibilité de 50 tonnes : un des plateaux de la presse porte une rotule. La compression est exercée dans le sens de la plus grande dimension de l'éprouvette; des cartons de 1,8 mm d'épaisseur sont interposés entre les faces terminales de l'éprouvette et les plateaux de la presse; la vitesse de croissance de la pression est toujours la même. La contrainte de rupture est connue à 50 kg près, soit 1,5 % près environ.

2.52 — Résultats.

2.521 — Densités.

La courbe de répartition présente une régularité beaucoup moins bonne que la courbe de la figure 10; c'est un résultat auquel il fallait s'attendre, l'expérimentation ne portant ici que sur 160 éprouvettes alors que

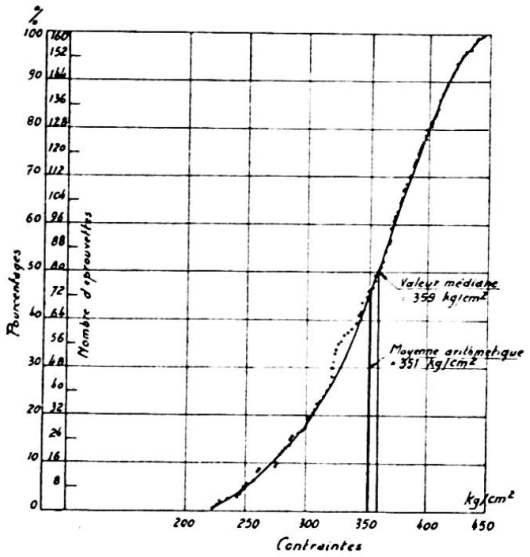


Fig. 14. Eprouvettes n° 2 - Mortier. Contraintes de rupture par compression.

la courbe de la figure 10 représentait une expérimentation portant sur 953 éprouvettes.

2.522 — Contraintes de rupture.

La courbe de la figure 14 résume les résultats des essais de compression effectués sur les éprouvettes de mortier du type n° 2.

2.6 — *Mesures et essais sur les éprouvettes n° 3*

Les essais ont porté sur 80 éprouvettes de mortier du type n° 3.

2.61 — Techniques de mesure et d'essai.

Les techniques utilisées pour les mesures, les pesées et les essais des éprouvettes n° 3 ont été, en tous points, semblables à celles utilisées pour les éprouvettes n° 2, elles n'appellent pas de commentaires particuliers.

Ces éprouvettes étant plus élancées que les précédentes, les plans de fissuration provoqués par la compression débouchent nettement sur les faces latérales, les faces terminales restant intactes; il arrive cependant parfois qu'une sorte de pyramide se forme sur l'une des bases et pénètre dans l'éprouvette en la faisant éclater.

2.62 — Résultats.

La répartition des densités des éprouvettes n° 3 est représentée par la courbe de la figure 15.

Les contraintes de rupture données par l'essai de ces mêmes éprouvettes à la compression sont indiquées par la courbe de la figure 16.

2.7 — *Mesures et essais sur les éprouvettes n° 4*

Les essais ont porté sur 80 éprouvettes de mortier du type n° 4.

2.71 — Techniques de mesure et d'essai.

Les techniques utilisées pour les mesures, les pesées et les essais des éprouvettes n° 4 ont été identiques à celles qui ont été utilisées pour les éprouvettes n° 2 et les éprouvettes n° 3.

Le poids d'une éprouvette s'élevant à près de 30 kg, la précision des

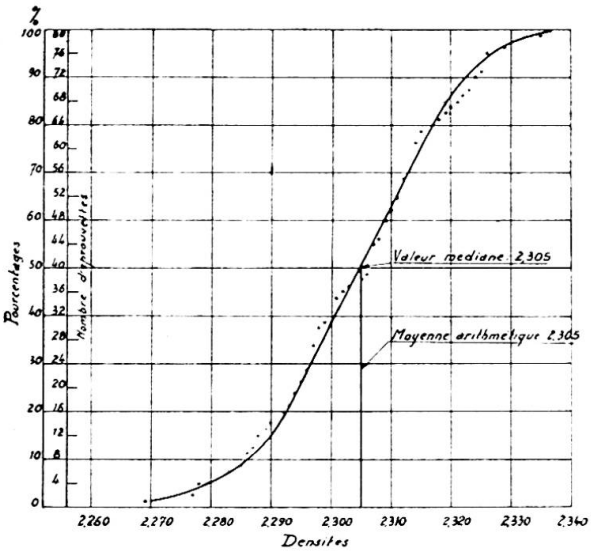


Fig. 15. Eprouvettes n° 3 - Mortier. Densités.

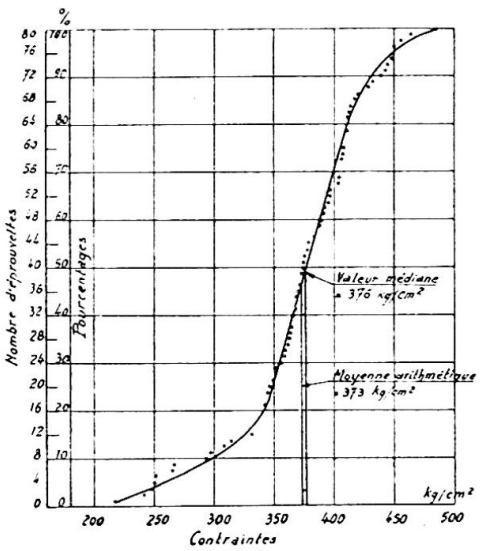


Fig. 16. Eprouvettes n° 3 - Mortier. Contraintes de rupture par compression.

pesées n'est toutefois plus que de 50 g, ce qui correspond à une précision relative de 1,7/1 000. L'incertitude des mesures reste toutefois, comme dans les cas précédents, très inférieure à l'incertitude qui provient de la nature du matériau et il n'y a pas lieu d'en tenir compte.

2.72 — Résultats.

Les courbes des figures 17 et 18 représentent la répartition des densités et des contraintes de rupture des éprouvettes n° 4.

3 – Essais sur éprouvettes de béton

3.1 — *Description des éprouvettes*

Les éprouvettes de béton essayées ont été des types n° 2, n° 3 et n° 4; seul le type n° 1 a été abandonné, ses dimensions étant trop petites auprès des dimensions des gros grains de l'agrégat; la description détaillée de ces éprouvettes a été donnée à propos des essais sur mortier.

3.2 — *Fabrication des éprouvettes*

3.21 — Moules.

Les moules sont ceux qui ont servi à la fabrication des éprouvettes de mortier, sans modifications importantes.

3.22 — Composition du béton.

La composition du béton est la suivante, en poids :

2 parties de ciment Lafarge 250/315 ;
1 partie de sable fin (0,4 mm-0,5 mm) ;
2 parties de sable gros (2 mm-3 mm) ;
6 parties de gravier (12,5 mm-20 mm),

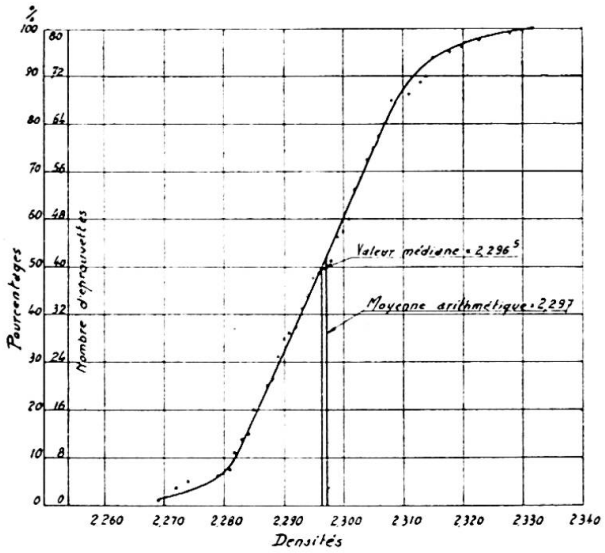


Fig. 17. Eprouvettes n° 4 - Mortier. Densités.

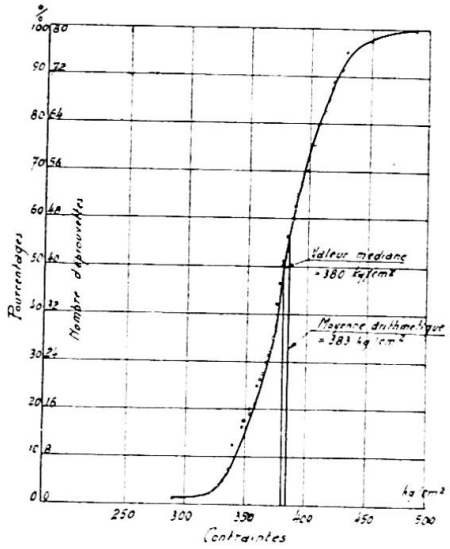


Fig. 18. Eprouvettes n° 4 - Mortier. Contraintes de rupture par compression.

les dimensions indiquées pour les grains étant le diamètre des trous des passoires correspondantes.

Cette composition correspond donc à la composition du mortier avec un élément plus gros.

La quantité d'eau était définie par le rapport $\frac{C}{E} = 2{,}43$, un peu supérieure à celle du mortier (2,315).

3.23 — Fabrication des éprouvettes.

Le malaxage du béton dure 5 minutes; il a été effectué à la pelle, toujours par le même ouvrier, dans une salle dont la température est restée égale à 19° ± 1°.

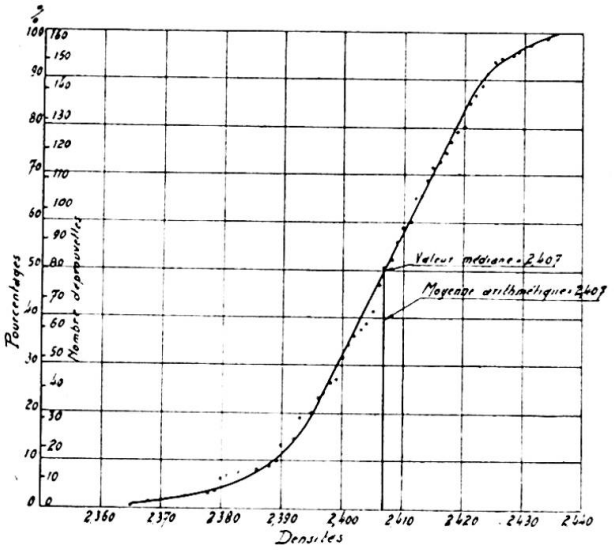


Fig. 19. Eprouvettes n° 2 - Béton. Densités.

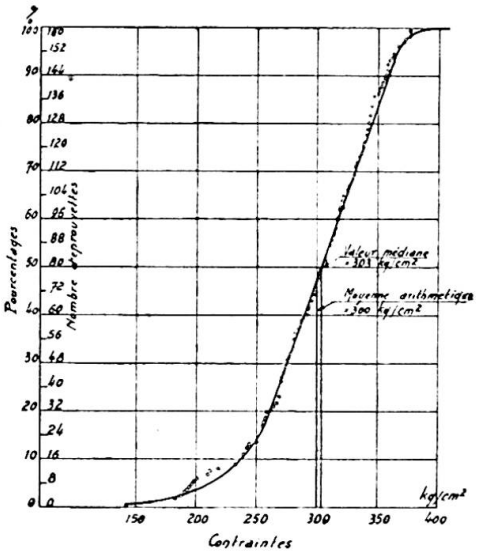


Fig. 20. Eprouvettes n° 2 - Béton. Contraintes de rupture par compression.

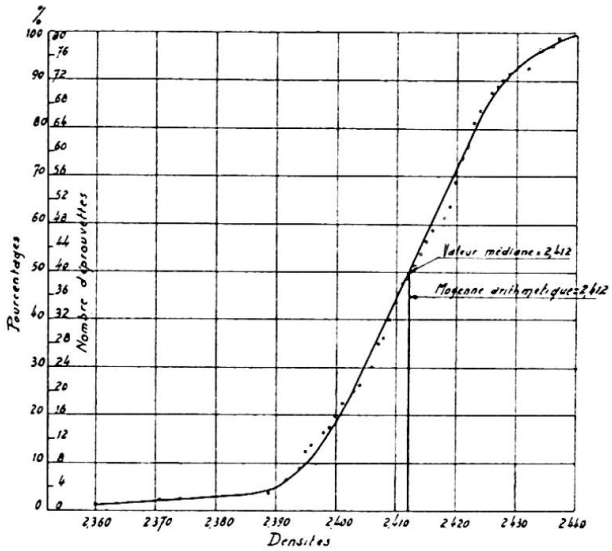


Fig. 21. Eprouvettes n° 3 - Béton. Densités.

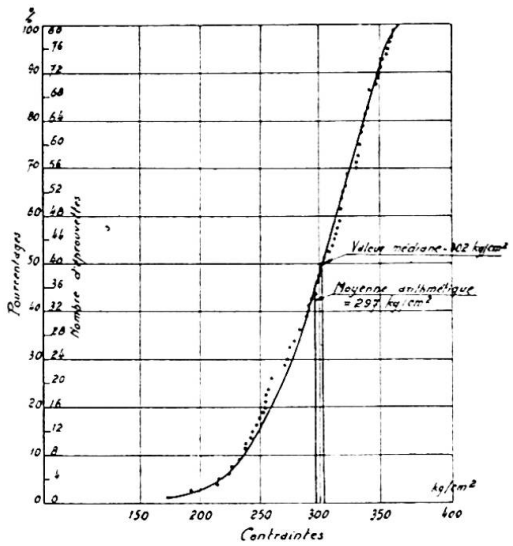


Fig. 22. Eprouvettes n° 3 - Béton. Contraintes de rupture par compression.

La mise en place dans les moules a été effectuée par vibration à l'aide des dispositifs déjà utilisés pour la fabrication des éprouvettes de mortier; les durées de vibration ont été de :

4 minutes pour les éprouvettes du type n° 2 (volume total 4 800 cm³);
4 minutes pour les éprouvettes du type n° 3 (volume total 4 800 cm³);
8 minutes pour les éprouvettes du type n° 4 (volume total 12 900 cm³),

la finition s'est montrée un peu plus délicate en raison de la présence d'éléments plus gros.

3.3 — *Mesures et essais sur les éprouvettes de béton*

3.31 — Techniques de mesure et d'essai.

Les techniques utilisées pour les mesures et les essais des éprouvettes de béton sont les mêmes que celles utilisées pour les éprouvettes de mortier et elles ne donnent lieu à aucune observation particulière.

3.32 — Résultats.

Les résultats obtenus sont présentés, sous la forme déjà utilisée pour

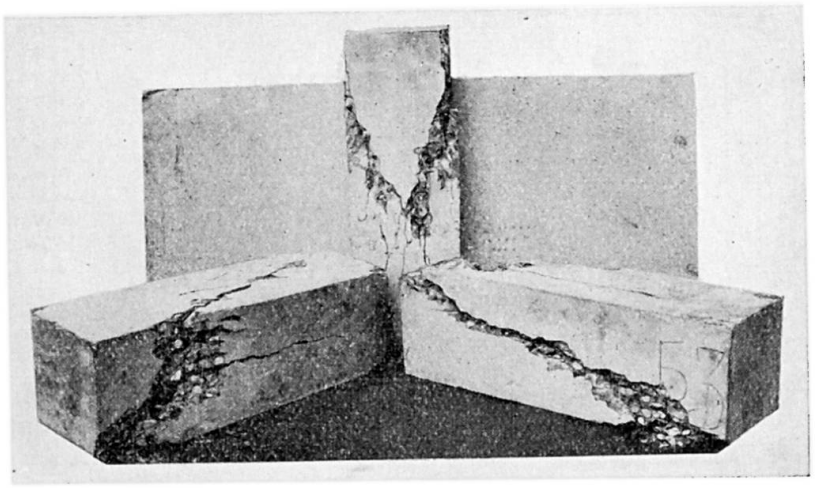


Fig. 23. Eprouvettes n° 4, de béton, rompues par compression.

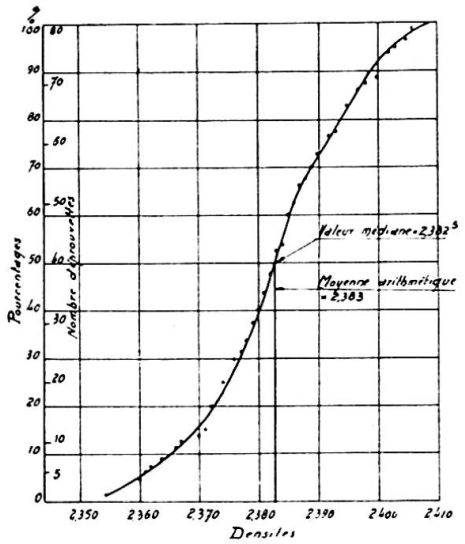
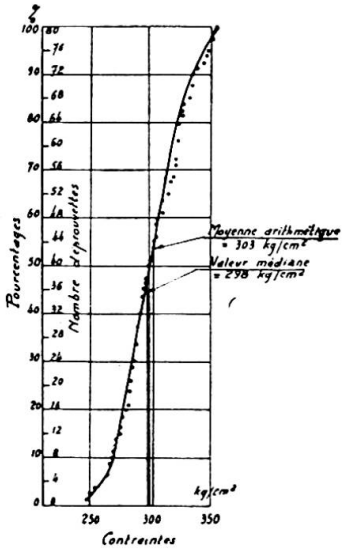


Fig. 24 (à gauche). Eprouvettes n° 4 - Béton. Densités.

Fig. 25 (à droite). Eprouvettes n° 4 - Béton. Contraintes de rupture par compression.



la présentation des résultats obtenus sur les éprouvettes de mortier, par les tableaux et figures ci-après :

Eprouvettes type n° 2 — Béton

Fig. 19. — Courbe de répartition des densités.
Fig. 20. — Courbe de répartition des contraintes de rupture par compression.

Eprouvettes type n° 3 — Béton

Fig. 21. — Courbe de répartition des densités.
Fig. 22. — Courbe de répartition des contraintes de rupture par compression.

Eprouvettes type n° 4 — Béton

Fig. 23. — Photographie d'éprouvettes rompues par compression.
Fig. 24. — Courbe de répartition des densités.
Fig. 25. — Courbe de répartition des contraintes de rupture par compression.

4 – Examen des résultats

L'ensemble des résultats obtenus donne lieu aux observations suivantes.

4.1 — *Nombre des éprouvettes essayées*

Les essais ont porté, rappelons-le pour le mortier, sur 953 éprouvettes du type n° 1, sur 160 éprouvettes du type n° 2, sur 80 éprouvettes du type n° 3 et sur 80 éprouvettes du type n° 4; pour le béton, sur 160 éprouvettes du type n° 2, sur 80 éprouvettes du type

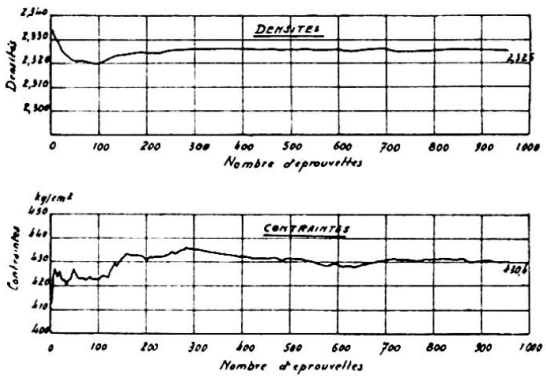


Fig. 26. Evolution des moyennes arithmétiques au cours de l'expérimentation.

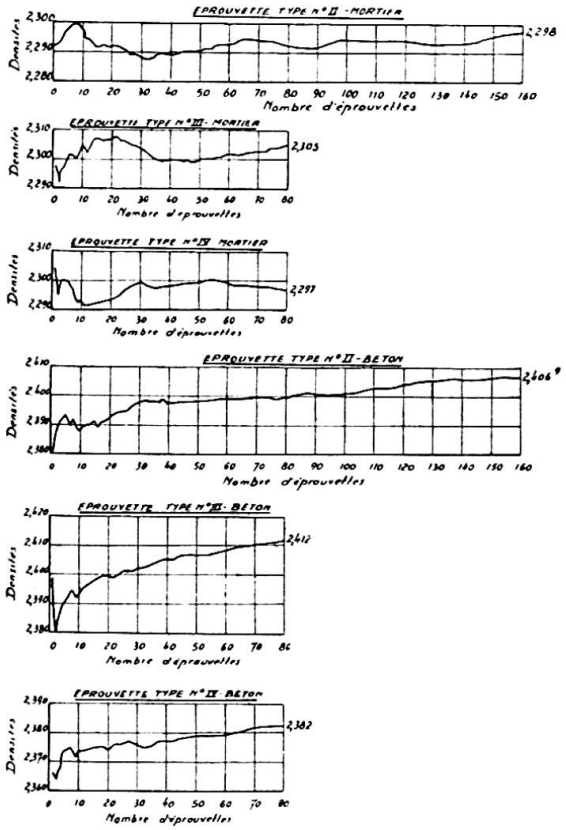


Fig. 27. Evolution des moyennes (densités) au cours de l'expérimentation.

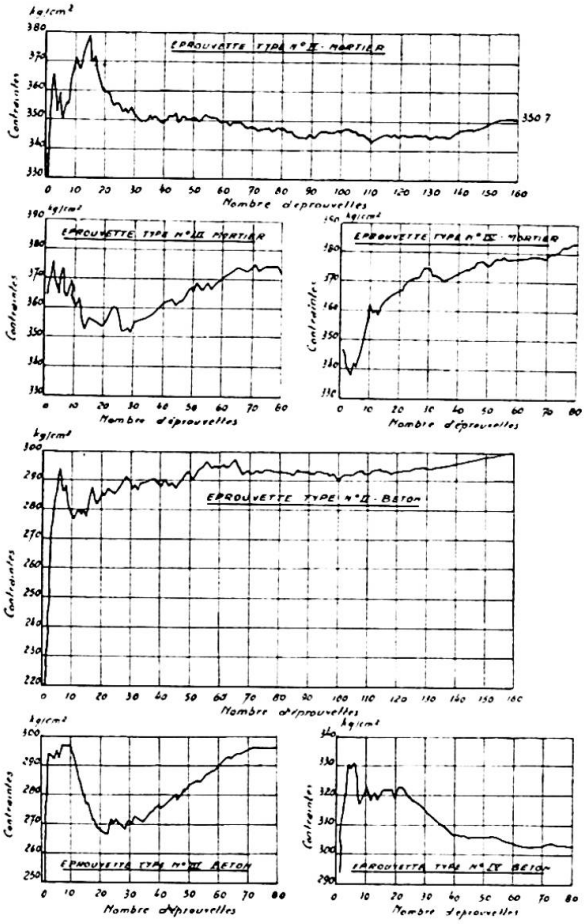


Fig. 28. Evolution des moyennes (contraintes de rupture par compression) au cours de l'expérimentation.

n° 3 et sur 80 éprouvettes du type n° 4. Le simple aspect des courbes de répartition montre, comme on pouvait s'y attendre, une régularité d'autant meilleure, en général, que la série est plus nombreuse. On peut se demander, toutefois, quel intérêt il y a à choisir un nombre plutôt qu'un autre, si 900 éprouvettes sont utiles ou nécessaires ou si l'on peut se contenter d'opérer sur 160 éprouvettes, sur 80 ou même sur un nombre d'éprouvettes inférieur.

Nous avons, pour répondre à cette question, établi les courbes des figures 26, 27 et 28 qui représentent l'évolution de la moyenne arithmétique des diverses caractéristiques mesurées au fur et et à mesure du développement de l'expérimentation. La première courbe de la figure 26, par exemple, représente, en ordonnée, la valeur de la densité moyenne de l'ensemble des éprouvettes, rangées dans leur ordre de fabrication, depuis l'origine de la série jusqu'à l'éprouvette dont le numéro est porté en abscisse.

Les courbes des figures 27 et 28 ont toutes été faites avec la même échelle pour les abscisses (1 mm pour 1 éprouvette) pour faciliter les comparaisons; on a dû, par contre, adopter une échelle plus réduite (1 mm pour 5 éprouvettes) pour les éprouvettes n° 1 beaucoup plus nombreuses (fig. 26).

Sur toutes ces courbes on voit apparaître une sorte de stabilisation plus ou moins parfaite lorsque le nombre d'éprouvettes essayées croît, mais le degré de cette stabilisation est très variable selon les cas et selon le nombre des éprouvettes. La première courbe de la figure 26, relative aux densités des éprouvettes n° 1 par exemple, montre un début de stabilisation à partir de 150 éprouvettes et une stabilisation remarquable à partir de 250 éprouvettes. La deuxième courbe de la figure 26, relative aux contraintes de rupture par compression des éprouvettes n° 1 montre, par contre, qu'il faut environ 400 éprouvettes pour obtenir une stabilisation à environ 1 % près; 150 éprouvettes donnent des oscillations dont l'amplitude est de l'ordre de 3 %. Les courbes des figures 27 et 28 montrent que la stabilisation n'a pas été pratiquement atteinte; les courbes affectent, assez souvent, une allure croissante qui semble indiquer une adaptation de l'opérateur et une amélioration de la technique de fabrication; les courbes d'allure descendante, par contre, font penser soit à une fatigue de l'opérateur soit à une détérioration des moules.

Cette expérimentation fixe au moins, pensons-nous, des ordres de grandeur certains, lorsqu'il s'agit d'éprouvettes de mortier ou de béton faites à la main; c'est 350 ou 400 éprouvettes qu'il faut essayer, en opérant avec beaucoup de soin, si l'on veut obtenir une moyenne définie à environ 1 % près. Quant aux essais tels qu'ils sont ordinairement pratiqués sur 5 ou 6 éprouvettes et qui donnent la moyenne de 5 ou 6 valeurs prises, au hasard, dans une série de valeurs qui varient fréquemment, pour les contraintes, du simple au double, on voit quel est le peu de précision qu'ils offrent et le peu de confiance qu'il faut leur accorder. Le très grand intérêt d'une fabrication d'éprouvettes entièrement automatique serait de réduire vraisemblablement d'une façon importante le nombre des éprouvettes nécessaires pour obtenir la même précision.

4.2 — *Comparaison des résultats*

Les résultats indiqués successivement pour les différentes séries d'éprouvettes essayées ont été rapprochés, pour faciliter les comparaisons dans les deux tableaux n° 29 et n° 30 que nous allons successivement examiner.

4.21 — Dimensions et poids.

Le tableau n° 29 indique la valeur moyenne et les écarts (maximum et moyen, absolu et relatif) des dimensions et du poids des différents types d'éprouvettes en mortier et en béton : a et b désignent les dimensions de la section carrée; h est la grande dimension, ou la hauteur; a représente la profondeur du moule, c'est-à-dire la distance entre le fond et le couvercle; b représente la distance entre les parois verticales du moule. On voit que la cote a, nominalement égale à la cote b, est, en fait, toujours supérieure à b et qu'elle présente des écarts, moyens et maximums toujours supérieurs à ceux de b ; cela tient au fait qu'il est nécessaire d'enlever le premier couvercle perforé pour procéder à une finition et à un arasement des éprouvettes avant de mettre en place le couvercle plein; il est alors inévitable que quelques éléments fins du mortier restent entre la partie inférieure du moule et le couvercle plein.

Encore qu'il ne soit pas aussi précis que nous l'aurions désiré, le moule des éprouvettes n° 1 apparaît comme sensiblement plus précis que les autres; ce moule a été, en effet, construit par un atelier spécialisé et tous

Types d'éprouvettes	COTE *a*					COTE *b*				
	Moyenne	Écart moyen		Écart maximum		Moyenne	Écart moyen		Écart maximum	
	mm	Absolu	Relatif %	Absolu	Relatif %	mm	Absolu	Relatif %	Absolu	Relatif %
MORTIER										
I	32,20	0,12	0,4	1,03	3,0	31,74	0,03	0,1	0,58	2,0
II	73,80	0,48	0,7	1,60	2,0	71,40	0,24	0,3	1,20	1,7
III	73,80	0,43	0,6	2,00	2,7	71,30	0,21	0,3	0,85	1,2
IV	161,45	0,68	0,4	2,15	1,3	159,10	0,40	0,3	2,30	1,4
BÉTON										
II	73,70	0,75	1,0	2,60	3,5	71,70	0.40	0,5	1,40	2,0
III	73,70	0,46	0,6	1,90	2,6	71,70	0,40	0,5	1,30	1,7
IV	160,80	0,80	0,5	3,70	2,3	159,00	0,36	0,2	0,70	0,4

les éléments en ont été fraisés tandis que les autres moules ont été construits par le laboratoire à l'aide de plats ou de profilés bruts de laminage.

En ce qui concerne les poids, on note, aussi bien pour le mortier que pour le béton, que les écarts absolus croissent de l'éprouvette n° 2 à l'éprouvette n° 3 et à l'éprouvette n° 4 mais que les écarts relatifs diminuent.

4.22 — Densités.

Le tableau fait apparaître une densité un peu plus forte pour les éprouvettes du type n° 1 et un peu plus faible pour les éprouvettes n° 4, mais il n'y a pas lieu d'insister beaucoup sur ce fait, l'écart des valeurs moyennes entre elles restant inférieur à 1 %.

L'écart moyen quadratique, de même que l'écart moyen arithmétique, décroît de l'éprouvette n° 2 à l'éprouvette n° 3 et à l'éprouvette n° 4; il en est de même pour les écarts maximums sauf pour un cas (écart maximum négatif de l'éprouvette de béton n° 3).

L'éprouvette du type n° 1 accuse des écarts faibles comparativement aux autres types d'éprouvettes en mortier alors qu'elle devrait, théoriquement, si les conditions de fabrication de tous les types d'éprouvettes avaient été identiques, présenter une dispersion plus grande. Nous pensons que l'opérateur, qui avait une longue pratique de ce type d'éprouvette, s'est trouvé incité — tout à fait inconsciemment d'ailleurs — à en soigner la fabrication Il convient de noter, par ailleurs, que le moulage simultané de 24 éprouvettes qui se trouvent avoir ainsi la même histoire est un élément de régularité qui disparaît lorsque les éprouvettes ne sont plus moulées que par 4, par 2 ou individuellement.

COTE *h*					POIDS				
Moyenne	Écart moyen		Écart maxim.		Moyenne	Écart moyen		Écart max.	
	Absolu	Relatif %	Absolu	Relatif %		Absolu	Relatif %	Absolu	Rel. %
mm					kg				
90,25	0,40	0,4	0,57	0,6	0,2146	0,001	0,5	0,006	3,0
223,60	0,78	0,35	2,10	0,9	2,708	0,04	1,3	0,14	5,6
454,90	0,40	0,1	1,20	0,3	5,511	0,05	1,0	0,18	3,3
501,40	0,30	0,1	1,00	0,2	29,6	0,17	0,5	0,50	2,0
223,70	0,79	0,3	2,50	1,1	2,844	0,03	1,0	0,12	4,2
454,60	0,60	0,1	2,10	0,5	5,790	0,04	0,7	0,19	3,4
501,40	0,33	0,1	0,90	0,2	30,5	0,14	0,5	0,60	2,0

FIG. 29. *Tableau des mesures des dimensions et des poids des différents types d'éprouvettes et de leurs écarts.*

4.23 — Contraintes.

Si nous considérons les valeurs médianes des éprouvettes de béton, nous observons, de l'éprouvette n° 2 à l'éprouvette n° 3 et à l'éprouvette n° 4, une décroissance faible mais tout de même assez nette. Ce résultat ne s'observe pas, notons-le tout de suite, si l'on considère les moyennes arithmétiques.

Le résultat est plus marqué si l'on considère les écarts; l'écart moyen relatif diminue assez peu, de 13 % à 12 %, de l'éprouvette n° 2 à l'éprouvette n° 3, mais il diminue notablement, de 12 % à 7 % de l'éprouvette n° 3 à l'éprouvette n° 4. Les écarts maximums font apparaître une variation non exactement semblable mais analogue.

Les variations de l'écart moyen observées sur les éprouvettes de mortier sont extrêmement voisines des variations observées sur les éprouvettes de béton et l'on peut en déduire, semble-t-il, que les différences de section influent davantage que les différences de hauteur sur la résistance à la compression.

Par contre les variations de résistance moyenne des éprouvettes en mortier sont nettement aberrantes, qu'il s'agisse des moyennes arithmétiques ou des valeurs médianes; les éprouvettes n° 1 donnent une résistance anormalement élevée alors que les éprouvettes n° 2 donnent une résistance anormalement basse. Quant aux éprouvettes n° 3 et n° 4, elles donnent des résistances moyennes peu différentes mais qui ne sont pas dans l'ordre auquel on devrait s'attendre.

Les éprouvettes n° 1 de mortier présentent, par ailleurs, un écart moyen relatif très faible (7 %) et des écarts maximums qui sont également faibles, relativement du moins.

Ces diverses anomalies résultent évidemment des techniques opéra-

Type d'éprouvettes	Dimensions S × h	Nombre d'éprouvettes	Nature	Valeurs de la densité		
				Moyenne arithmétique	Valeur médiane	
					Dans le tableau	Sur la courbe
	cm² cm					
1	10 × 9	953	Mortier	2,325	2,325	2,325
2	50 × 2,23	160	Mortier	2,298	2,2974	2,298
3	50 × 45	80	Mortier	2,305	2,3062	2,305
4	250 × 50	80	Mortier	2,297	2,297	2,2965
2	50 × 223	160	Béton	2,407	2,407	2,407
3	50 × 223	80	Béton	2,412	2,4125	2,412
4	250 × 50	80	Béton	2,383	2,3825	2,3825

toires qui n'ont pas été identiques dans tous les cas et, surtout, du matériel de moulage qui était différent d'un type d'éprouvette à l'autre. Il y a là un fait expérimental regrettable mais que nous devons constater.

C'est ainsi que les moyennes élevées et les faibles écarts obtenus avec l'éprouvette n° 1 résultent certainement :

— D'un moule plus précis;
— D'une technique opératoire particulièrement soignée;
— D'un groupement des éprouvettes par série de 24.

Les moyennes basses des éprouvettes de mortier type n° 2 sont particulièrement décevantes; elles sont dues, vraisemblablement, à une imperfection du moule qui comportait de petites cloisons intermédiaires dont l'enlèvement a permis de faire les éprouvettes n° 3; or ces cloisons étaient, primitivement, d'un dimensionnement insuffisant et elles étaient maintenues en place d'une façon imparfaite; il a pu en résulter un défaut de perpendicularité de l'une des faces terminales sur l'axe de l'éprouvette et un tel défaut peut aisément entraîner une chute de résistance à la compression de l'ordre de 15 %. Une amélioration du moule réalisée après la fabrication des éprouvettes de mortier paraît avoir été efficace car les éprouvettes de béton du type n° 2 ne présentent pas la même anomalie.

On aurait dû, sans doute, sans cette imperfection du moule, trouver une valeur moyenne d'environ 400 kg/cm² au lieu de 350 ou 360; l'erreur est donc systématique et considérable.

Il est intéressant de noter que, pour le béton, les éprouvettes n° 2 présentent un écart maximum négatif supérieur à trois fois l'écart moyen quadratique, tandis que les éprouvettes n° 4 présentent un écart maximum négatif à peine supérieur à deux fois l'écart moyen quadratique.

Ecarts						
Ecart quadratique	Ecart moyen		Ecart maximum			
			Positif		Négatif	
	Absolu	Relatif	Absolu	Relatif	Absolu	Relatif
		%		%		%
0,010	0,008	0,3	0,037	1,6	0,039	1,7
0,020	0,016	0,7	0,046	2	0,037	1,6
0,015	0,012	0,5	0,032	1,4	0,036	1,6
0,013	0,010	0,4	0,035	1,5	0,028	1,2
0,014	0,012	0,5	0,042	1,7	0,029	1,2
0,014	0,011	0,4	0,029	1,2	0,052	2,2
0,012	0,010	0,4	0,026	1,1	0,029	1,2

FIG. 30. DENSITÉS.

Tableau récapitulatif des moyennes des résultats et des écarts.

4.3 — *Ajustement des courbes de répartition*

On est naturellement conduit à se demander si les courbes de répartition des résultats obtenus, pour les densités et pour les contraintes, peuvent être ajustés d'une façon satisfaisante par une fonction analytique et, notamment, par une fonction de Laplace-Gauss.

Un tel ajustement est possible — les courbes de fréquences cumulées qui ont été données le montrent à l'évidence — d'une façon extrêmement satisfaisante dès que l'on opère sur 300 ou 400 éprouvettes ou plus, si l'on considère la partie centrale de la courbe et même l'extrémité de la courbe correspondant aux valeurs supérieures à la moyenne. Par contre l'ajustement devient généralement mauvais pour la partie basse des courbes, celle qui correspond aux valeurs très inférieures à la moyenne et qui sont justement celles qui sont susceptibles de compromettre la sécurité d'un ouvrage; presque toutes les courbes de répartition présentent, en effet, quelques résultats anormalement faibles, en nombre assez petit mais tout de même supérieur à ce que devrait donner une répartition normale.

Nous pensons donc qu'il convient de n'aborder qu'avec beaucoup de prudence les spéculations mathématiques auxquelles on peut être tenté de se livrer en supposant que les résultats se répartissent suivant une loi de Laplace-Gauss; les résultats de tels calculs appellent d'évidentes réserves.

Il faut cependant bien les entreprendre, ces calculs, si l'on veut extrapoler quelque peu les résultats de l'expérimentation faite au laboratoire et si l'on veut estimer, au moins d'une manière approchée, quelle est la caractéristique de probabilité 10^{-6} par exemple, en ne faisant que quelques dizaines ou, au plus, quelques centaines d'essais. Un résultat approxima-

FIG. 31. *Tableau des écarts moyens positif et négatif des contraintes de rupture.*

Type d'éprouvette	Contrainte moyenne en k/cm²	Nombre total d'éprouvettes	Ecart moyen total		Ecart moyen positif			Ecart moyen négatif		
			Absolu en k/cm²	Relatif en %	Nombre d'éprouvettes	Absolu en k/cm²	Relatif en %	Nombre d'éprouvettes	Absolu en k/cm²	Relatif en %
Mortier										
N° I	430	953	31	7	497	29,6	6,9	447	34,1	7,9
II	351	160	43	12	86	41,4	11,8	74	48,1	13,7
III	373	80	41	11	42	38,6	10,4	37	43,4	11,6
IV	383	80	25	6,5	37	27,1	7	41	24,3	6,3
Beton										
N° II	300	160	40	13	86	36	12	72	44,1	14,8
III	297	80	37	12	43	35,1	11,8	36	40,8	12,1
IV	303	80	22	7	36	23,4	7,7	43	20,7	6,8

tif vaut évidemment moins qu'un résultat précis, mais il vaut encore mieux que pas de résultat du tout.

5 – Utilisation des résultats

5.1 — *Détermination des caractéristiques d'une pièce de grandes dimensions*

Quoique notre expérimentation ne soit pas aussi concluante que nous l'aurions souhaité, elle montre cependant que les caractéristiques mécaniques d'une pièce de grandes dimensions ne doivent pas être identiques à celles qui sont relevées sur des éprouvettes de petites dimensions et qu'elles doivent être obtenues par extrapolation des valeurs obtenues sur des types d'éprouvettes de dimensions croissantes, tant en ce qui concerne les valeurs moyennes que les écarts. Nos résultats ne permettent guère une extrapolation de ce genre en raison des diverses imperfections que nous avons signalées mais ils indiquent du moins dans quelles conditions devrait être, désormais, entreprise une expérimentation satisfaisante. Cette expérimentation devrait notamment s'attacher à obtenir des conditions de fabrication étroitement semblables pour les différents types d'éprouvettes, malgré des différences de dimensions qui devraient être cependant assez importantes.

Alors que les éprouvettes de béton ont donné des résistances à la compression de l'ordre de 300 kg/cm² il est possible qu'une pièce de grandes dimensions ne présente plus qu'une résistance moyenne de l'ordre de 280 kg/cm², mais avec un écart moyen qui s'abaisserait peut-être à 5 %.

Nous ne pouvons, au terme de cette première expérimentation, donner qu'une indication.

5.2 — *Détermination d'une limite de sécurité*

Admettant que nous ayons déterminé, pour l'élément d'ouvrage de grandes dimensions que nous avons à considérer, une résistance définie par une valeur moyenne et un écart moyen probables, comment pouvons-nous déterminer la contrainte limite de sécurité à ne pas dépasser ?

La méthode théorique consisterait :

1° A fixer le risque de ruine accepté, 10^{-5} ou 10^{-6} par exemple;

2° A calculer la contrainte qui correspond à un tel risque, en admettant que les valeurs possibles de la résistance considérée s'ajustent par une loi de Laplace-Gauss.

On serait de la sorte conduit à admettre comme limite de sécurité la valeur moyenne diminuée environ, de 4 ou 5 fois l'écart moyen.

On peut discuter le choix d'un risque de 10^{-5} ou 10^{-6} ; on peut, d'autre part, formuler à l'égard de la méthode de calcul sus-indiquée des réserves sur lesquelles nous avons déjà attiré l'attention.

On peut dès lors tout aussi bien, pensons-nous, admettre intuitivement que la limite de sécurité peut se définir par la valeur moyenne diminuée d'un certain nombre de fois l'écart moyen (écart arithmétique ou quadratique), ce qui paraît assez raisonnable, et discuter simplement sur ce nombre.

Le choix paraît devoir se circonscrire entre 4, 5 ou 6 fois un écart qui paraît devoir être lui-même de l'ordre de 4 %, 5 % ou 6 % pour les pièces de grandes dimensions; en sorte que pour une résistance moyenne de 280 kg/cm² on serait conduit à adopter une limite de sécurité qui pourrait varier de 180 kg/m² à 235 kg/cm², chiffres très supérieurs aux limites ordinairement admises.

Par contre, pour des pièces de faibles dimensions, pour des voiles minces par exemple, dont l'épaisseur s'abaisse parfois à quelques centimètres, la prise en compte d'un écart moyen de 15 % ne laisserait plus, avec une valeur moyenne de 300 kg/cm² qu'une limite de sécurité de :

120 kg (valeur moyenne diminuée de 4 fois l'écart moyen);
75 kg (valeur moyenne diminuée de 5 fois l'écart moyen);
30 kg (valeur moyenne diminuée de 6 fois l'écart moyen),

chiffres qui deviennent ainsi notablement inférieurs aux limites ordinairement admises.

Une variante consisterait à considérer non pas l'écart moyen de l'ensemble des valeurs observées mais l'écart moyen calculé seulement sur les valeurs inférieures à la moyenne arithmétique ou à la médiane, ce qui conduirait à une limite de sécurité plus sévère mais, en somme, très défendable. On pourrait même, allant plus loin dans cette voie, considérer l'écart moyen des n valeurs les plus basses ($n = 10$ % ou 20 %) sauf à diminuer corrélativement le coefficient multiplicateur de cet écart.

Quelle que soit la méthode adoptée, l'application de ces vues théoriques mettrait en évidence et concrétiserait, en quelque sorte, l'intérêt qu'il y a à réaliser un matériau homogène présentant une faible dispersion.

6 – Conclusions

De l'ensemble de l'expérimentation qui vient d'être exposée on peut, pensons-nous, dégager les conclusions suivantes; certaines de ces conclusions ont déjà été formulées plusieurs fois, peut-être n'est-il pas inutile de les formuler une fois de plus.

6.1 — Les résultats d'essais sur éprouvettes de mortier et sur éprouvettes de béton dépendent d'une façon importante — fâcheusement importante — des techniques de fabrication des dites éprouvettes. Il en résulte :

6.12 — Que les essais destinés au contrôle de la qualité des ciments doivent être faits selon des techniques extrêmement précises, toujours identiques à elle-mêmes et qu'il serait très désirable de rendre entièrement automatiques;

6.13 — Que les essais destinés au contrôle de la qualité d'un béton doivent être effectués à l'aide de prélèvements faits à l'improviste dans les gâchées du chantier.

6.2 — Les essais doivent être plus nombreux qu'on ne l'estime ordinairement si l'on veut obtenir des résultats ayant quelque précision. Lorsqu'on effectue, par exemple, des essais de résistance à la compression de mortier ou de bétons il importe de se rappeler qu'on obtient normalement des résultats qui varient du simple au double, même en prenant les plus grandes précautions pour opérer dans des conditions aussi identiques que possibles.

6.21 — Une expérimentation soignée doit s'attacher à déterminer non seulement une valeur moyenne mais à caractériser la dispersion des résultats obtenus, par le calcul de l'écart moyen et des écarts maximums positif et négatif.

6.22 — La régularité de la qualité d'un béton (faible dispersion de sa résistance) est une qualité aussi importante que sa valeur moyenne.

6.3 — Les caractéristiques observées sur un type d'éprouvette dépendent de ses dimensions; en règle générale, la valeur moyenne de la résistance à la compression, par exemple, diminue lorsque les dimensions de l'éprouvette augmentent, toutes choses restant égales par ailleurs; la dispersion diminue également, d'une façon appréciable, lorsque les dimensions du type d'éprouvette utilisé augmentent.

6.31 — A moins de faire des essais sur pièce en vraie grandeur, ce n'est donc que par extrapolation qu'on peut estimer la résistance d'une pièce de grandes dimensions à l'aide des résultats obtenus sur des éprouvettes de dimensions sensiblement moindres.

6.4 — Ayant ainsi déterminé, par interpolation ou par extrapolation, pour la pièce à construire, une valeur moyenne probable et un écart moyen probable de la résistance, on peut alors déterminer une limite de sécurité égale à cette valeur moyenne diminuée d'un certain nombre de fois l'écart moyen.

Cette manière de procéder paraît plus rationnelle et plus précise que celle qui consiste à adopter un coefficient de sécurité global purement empirique.

L'expérimentation dont les résultats viennent d'être exposés a été conduite, sous notre direction, au Laboratoire des Ponts et Chaussées, par M. Vironnaud, Ingénieur des Travaux publics de l'Etat, Chef de Section, et ses collaborateurs à qui nous sommes heureux d'adresser tous nos remerciements pour le travail extrêmement important qu'ils ont exécuté dans un temps relativement court.

Nous adressons enfin tous nos remerciements à la Chambre syndicale des Constructeurs en Béton et en Béton armé dont la subvention nous a aidé à résoudre quelques difficultés matérielles et à mener nos recherches à bonne fin.

Résumé

Nous avons indiqué dans notre *Rapport introductif sur la Sécurité des Constructions* (3) que la détermination rationnelle d'un coefficient de sécurité exigeait que l'on tienne compte :

D'une part, de la dispersion des résultats d'essais des matériaux;

D'autre part, de la dimension des éprouvettes sur lesquelles les essais ont été effectués.

Les expériences dont les résultats sont exposés dans le présent rapport illustrent ces deux observations et montrent l'intérêt qu'il y a :

1° A procéder à des essais suffisamment nombreux;

2° A procéder à des essais sur des éprouvettes de dimensions différentes.

La conclusion pratique de ces expériences est que les coefficients de sécurité traditionnels sont probablement inutilement élevés pour les pièces de grandes dimensions tandis qu'il se pourrait bien qu'ils soient parfois insuffisants pour les pièces de faible épaisseur.

Zusammenfassung

Wir haben in unserem *Einführungsbericht über die Sicherheit der Bauwerke* (4) gezeigt, dass bei der rationellen Bestimmung eines Sicherheitskoeffizienten auf folgende Punkte besondere Rücksicht genommen werden muss :

Einerseits auf die Streuung der Versuchsergebnisse bei der Materialprüfung;

Anderseits auf die Abmessungen der Probekörper, an welchen die Versuche durchgeführt werden.

Die Versuche, deren Ergebnisse in diesem Beitrag beschrieben werden, beleuchten diese beiden Beobachtungen und zeigen, wie wichtig es ist, dass

1. Eine genügend grosse Anzahl von Versuchen vorgenommen wird;

2. Versuche an Probekörpern mit verschiedenen Abmessungen durchgeführt werden.

Es kann aus diesen Untersuchungen der Schluss gezogen werden, dass

(3) *Publication Préliminaire*, V *a* 1, p. 571.
(4) *Vorbericht*, V *a* 1, S. 571.

die üblichen Sicherheitskoeffizienten möglicherweise, für Bauteile mit grossen Abmessungen unnötig erhöht wurden, während umgekehrt die Möglichkeit besteht, dass sie oft ungenügend für solche von geringer Stärke sind.

Summary

As stated in our *Introductory Report* on *Safety of Structures* ([5]) for the rational determination of a safety factor it must be taken into account :

On the one hand the dispersion of results of testing materials;

On the other hand the size of the specimens.

Investigations, whose results are given in this report confirm these observations and prove that it is of interest :

1. To make enough tests;
2. To make tests on specimens of various size.

The practical conclusion of these investigations is that the traditional safety factors are probably uselessly high for great size pieces, while they may be insufficient for thin pieces.

([5]) *Preliminary Publication*, V *a* 1, p. 571.

V-4

Notes sur le coefficient de sécurité

Bemerkungen zum Sicherheitskoeffizient

Notes on safety factor

PROF. E. TORROJA
Directeur du Laboratoire central de Ensayo de Materiales de Construccion, Madrid

Ce mémoire a pour but d'indiquer brièvement les idées fondamentales qui servent de base pour une étude sur la détermination du coefficient de sécurité et qu'on développe à l'Institut technique de la Construction à Madrid; les premiers résultats seront publiés prochainement.

Comme M. le professeur Campus l'a dit dans son exposé, le nombre de variables à envisager est si grand et la nature de ces variables est tellement hétérogène que le procédé à envisager pour arriver à des résultats concrets par des moyens simples, logiques ou mathématiques est difficile à concevoir.

Actuellement, ce problème n'est résolu que partiellement, et je me propose de donner ci-après quelques idées sans entrer dans tous ses détails et variantes.

Lorsqu'il se présente, dans la vie, un danger, on accepte un risque proportionnel à l'intérêt qu'on compte recueillir.

Il semble logique et juste d'accepter la même considération pour une construction, qui a un coût, une probabilité d'écroulement et un bénéfice à rapporter. On doit faire l'étude économique en se basant sur le coût total de la construction, augmenté du produit de la probabilité d'écroulement par le coût de la reconstruction. Il faudra ajouter à ce dernier les frais d'indemnisation causés par l'écroulement, les pertes de revenus pendant la période de reconstruction, etc. Si ce coût total est rentable ou justifie, pour des raisons non économiques, l'œuvre à réaliser, on doit construire; dans le cas contraire, il faut y renoncer. En tout cas, du point de vue économique, raisons esthétiques, etc., non considérées, on doit choisir le projet et surtout le coefficient de sécurité C, de façon que le coût total soit minimum, c'est-à-dire

$$P + p(P' + D) = f(C) = \text{minimum}$$

P étant le coût de la construction;
P′ le coût probable de la reconstruction;
p la probabilité d'écroulement;
D le montant de l'indemnisation que peut occasionner l'écroulement.

On doit inclure dans ce montant les pertes humaines avec une valeur humanitaire et pas seulement économique.

La valeur de D peut en général être fixée approximativement d'avance. Les valeurs de P et P′, considérées généralement égales, varient en fonction de C, selon le type de construction ou élément dont il s'agit; mais on peut établir sa loi de variation approchée dans chaque cas. On peut prendre la probabilité p égale au produit des probabilités correspondantes aux différentes causes d'écroulement :

Surcharges différentes de celles prévues;
Tensions réelles, différentes de celles données par une théorie ou d'une méthode de calcul approchée;
Opérations de calcul erronées;
Exécution imparfaite;
Défauts des matériaux.

Si, pour chacun d'eux, on pouvait admettre la loi de Gauss, le problème serait relativement simple; tout reviendrait à établir les coefficients respectifs.

Malheureusement, on ne peut pas l'admettre pour tout, et le problème se complique; mais, en acceptant certaines simplifications, on obtient des résultats satisfaisants, c'est-à-dire des valeurs approchées des coefficients de sécurité différentes selon les cas, et qui peuvent servir de base pour établir une étude plus poussée.

Sans doute, le manque de statistiques d'une part, et la complexité du problème d'autre part, rendent la résolution exacte impossible; la solution exposée et même celle plus complète, qu'on prépare, n'ont d'autre but que celui d'ouvrir un chemin possible et, en tout cas, de constituer un premier jalon pour la discussion.

Mais, le principe étant admissible, on peut espérer que le résultat obtenu sera meilleur, si imparfait qu'il soit, que la solution actuelle qui consiste à fixer le coefficient de sécurité suivant les circonstances. Ce coefficient dépendra dans la plupart des cas, plus de l'humeur de l'ingénieur que des conditions objectives de la construction.

Résumé

Toute construction a un coût qui dépend du coefficient de sécurité C adopté et une probabilité d'écroulement p qui dépend également de ce coefficient C. En cas d'écroulement, il faudra envisager les frais de reconstruction P′ augmentés des dommages et intérêts D. L'auteur propose de choisir le coefficient de sécurité rendant minimum la somme :

$$P + p(P' + D) .$$

Zusammenfassung

Jedes Bauwerk besitzt eine Kostensumme, welche vom angenommenen Sicherheitskoeffizient C und eine Einsturzwahrscheinlichkeit p, die auch vom erwähnten Koeffizient abhängt.

Im Falle eines Einsturzes muss mit den Wiederaufbaukosten P′ und den Unkosten D infolge der verursachten Schäden gerechnet werden. Der Verfasser schlägt vor, als Sicherheitskoeffizient denjenigen anzunehmen, der in jedem Falle die kleinste Summe

$$P + p(P' + D)$$

ergibt.

Summary

The cost of a construction depends on the safety factor C adopted; the collapse probability p depends also on this factor.

In case of collapse on a structure, one must consider the reconstruction cost P′ and the damages D. The author proposes to select the safety factor as to make a minimum the sum :

$$P + p(P' + D) .$$

Imprimerie G. Thone, Liège (Belgique)