

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

COURS DE CONSTRUCTION DU GÉNIE CIVIL

N° 41

Essais de compression de piliers

EN

maçonnerie de briques

PAR

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège,
Directeur du laboratoire d'essais des constructions
du Génie Civil.

Extrait

du « *Bulletin du Centre de Documentation du Bâtiment* »,
N° 2 du 1^{er} trimestre 1939.

BRUXELLES

IMPRIMERIE A. LESIGNE

27, Rue de la Charité

1939

Essais de compression de piliers en maçonnerie de briques

par F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège,
Directeur du Laboratoire d'essais
des constructions du Génie Civil

Il a été procédé récemment au laboratoire à des essais de compression sur deux piliers en maçonnerie de briques, destinés à l'édification et à la documentation des élèves-ingénieurs civils et conducteurs civils des constructions. De tels essais sont peu fréquents. C'est la raison pour laquelle il a paru utile que leurs résultats soient communiqués à un cercle plus important, à titre documentaire, encore qu'ils n'aient aucune tendance systématique.

I. — Caractéristiques des briques.

Les briques sont des briques de Campine du format moyen $200 \times 95 \times 55$ mm. Les résultats des essais à la compression sont les suivants :

1) Essai standardisé, effectué sur deux demi-briques superposées avec joint de mortier, les faces comprimées étant rectifiées.

Résistance en Kg/cm^2 : 390 - 450 - 498 - 442 - 460 - 380.

Moyenne : 436,67.

Ecart maxima par rapport à la moyenne : -13% et $+14\%$.

2) Ecrasement de briques à plat, faces comprimées rectifiées.

Résistance en Kg/cm^2 : 865 - 598 - 630 - 783 - 676 - 670.

Moyenne : 703.

Ecart maxima : -15% et $+23\%$.

3) Ecrasement de briques posées sur champ, faces comprimées rectifiées.

Résistance en Kg/cm^2 : 427 - 422 - 397 - 251 - 352 - 271.

Moyenne : 353.

Ecart maxima : -29% et $+21\%$.

4) Ecrasement de briques posées debout, faces comprimées rectifiées.

Résistance en Kg/cm^2 : 322 - 600 - 152 - 203 - 171 - 470.

Moyenne : 319,67.

Ecart maxima : $-52,5\%$ et $+88,5\%$.

5) Essai de flexion de briques à plat, soumises à une charge concentrée agissant à mi-distance de deux appuis distants de 17 cm. Les briques ont été au préalable desséchées à l'étuve à $100-110^\circ \text{C}$.

Charge de rupture (Kg) : 461 - 457 - 407 - 453 - 412 - 470 - 415 - 254 - 620 - 490 - 470 - 570 - 585 - 493 - 575 - 720 - 435 - 465 - 460 - 550.

Tension de rupture (Kg/cm^2) : 44 - 43,5 - 37,4 - 40 - 39,4 - 40,9 - 38,2 - 24,2 - 56 - 46,9 - 44,8 - 50,5 - 55 - 46,5 - 54,5 - 64,2 - 39,7 - 42,4 - 48,3 - 52,4.

Valeur moyenne : 45,45 Kg/cm^2 .

Ecart maxima : -47% et $+41,50\%$.

6) Essai de flexion de briques à plat comme ci-dessus, les briques ayant été imbibées d'eau à la température et à la pression ordinaires.

Charge de rupture (Kg) : 595 - 415 - 435 - 440 - 443 - 502 - 812 - 625 - 280 - 432 - 555 - 645 - 495 - 348 - 515 - 320 - 425 - 753 - 520.

Tension de rupture (Kg/cm²) : 56 - 41 - 39 - 38,7 - 45 - 70,4 - 57,1 - 26,1 - 39,7 - 51,5 - 54,1 - 46 - 33,4 - 48,2 - 26,7 - 39,6 - 66,3 - 43,7.

Moyenne : 45,85 Kg/cm².

Ecart maxima : -43 % et +56 %.

7) Essai de flexion de briques posées sur champ, soumises à une charge concentrée agissant à mi-distance de deux appuis distants de 17 cm. Etat d'humidité naturelle.

Charge de rupture (Kg) : 1560 - 980 - 1490 - 1240 - 1470 - 950 - 910 - 1715 - 1055 - 1230 - 1370 - 1000 - 1350 - 846 - 941 - 1110 - 1430 - 1315 - 1450 - 1000.

Tension de rupture (Kg/cm²) : 80,2 - 50,1 - 79,6 - 63,5 - 73,8 - 55,8 - 45,6 - 88,2 - 51,0 - 61,8 - 69,2 - 54,4 - 60,5 - 96,8 - 62,6 - 57,2 - 67,8 - 64,8 - 75,7 - 52,4.

Moyenne : 65,60 Kg/cm².

Ecart maxima : -30,5 % et +47,5 %.

N. B. — Les essais de compression ont été effectués sous une presse Amsler de 60 tonnes et les essais de flexion sous une presse Amsler de 10 tonnes.

8) Absorption d'eau des briques, en poids % :

8,47 - 8,63 - 9,38 - 10,40 - 8,38 - 9,22 - 7,98 - 8,74 - 9,15 - 8,76.

Moyenne : 8,91 %.

Ecart maxima : -10,5 % et +16,75 %.

II. — Caractéristiques du mortier.

La composition du mortier est la suivante :

Sable du Rhin 0/5	1000 Kg
Sable de Rocour	500 Kg
Ciment P. A. N.	600 Kg
Eau	330 Kg

Rapport ciment : eau = 1,85.

Le tableau suivant donne l'analyse granulométrique des sables, d'après les tamis à mailles carrées Tyler Standard :

Journal des mailles mm	Sable du Rhin 0/5	Refus cumulés %	Sable de Rocour
4.7	7		
2.36	18		
1.17	32		
0.589	66.4		1
0.295	96		1.5
0.147	99.4		30
Module de finesse	3.188		0.325

Le module de finesse du mélange de 1000 Kg de sable du Rhin et de 500 Kg de sable de Rocour est 2.25. Le module de finesse du mortier est environ 1.60.

Les caractéristiques de ce mortier sont les suivantes :

1) Résistance à la compression à l'âge de 7 jours, sur cubes de 10 cm. de côté.

Résistance en Kg/cm² : 166 - 158 - 162.

Poids des cubes (Kg) : 2,065 - 2,070 - 2,075.

2) Résistance à la flexion déterminée, à l'âge de 7 jours, sur prismes 4 × 4 × 16 cm.

Distance entre appuis 12 cm.; charge au milieu de la portée.

Charge totale de rupture (Kg) : 128 - 100 - 114 - 84 - 90.

Tension conventionnelle de rupture (Kg/cm²) : 35,9 - 28,1 - 32,0 - 23,6 - 25,3.

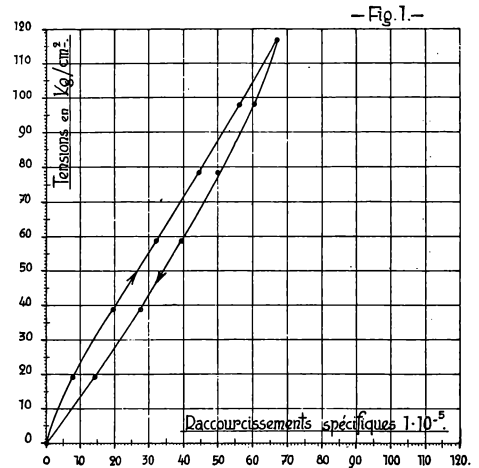
3) Résistance à la compression à l'âge de 28 jours, sur cubes de 10 cm. de côté.
 Résistance en Kg/cm² : 244 - 220 - 238.
 Poids des cubes (Kg) : 2,065 - 2,075 - 2,060.

4) Résistance à la flexion déterminée à l'âge de 28 jours comme ci-dessus, au 2).
 Charge totale de rupture (Kg) : 151 - 158 - 152 - 158 - 145.
 Tension conventionnelle de rupture (Kg/cm²) : 42,4 - 44,4 - 42,7 - 44,4 - 40,7.

5) Détermination de la loi de déformation du mortier en fonction des tensions de compression, sur un prisme de 16 × 16 × 50 cm., comprimé debout. Les déformations sont mesurées sur la partie centrale du prisme, de 290 mm. de hauteur, au moyen de deux comparateurs Stoppani, au 1/100 de mm. Cet essai a été fait à l'âge de 28 jours.

Il serait fastidieux de reproduire les valeurs des déformations mesurées. Le tracé des courbes des raccourcissements spécifiques en fonction des tensions de compression (fig. 1) est plus suggestif. Il a été procédé à deux cycles de mise en charge et de décharge, entre 0 et 30 tonnes, au moyen d'une presse Amsler de 60 tonnes.

D'après ces courbes, la valeur moyenne du module d'élasticité de compression du mortier, à l'âge de 28 jours, est



entre 0 et 35 Kg/cm² 206.000 Kg/cm²
 entre 0 et 70 Kg/cm² 179.500 Kg/cm²

N. B. — Toutes les éprouvettes du mortier ont été conservées à l'air humide.

III. — Écrasement d'un pilier de maçonnerie de briques de 1½ brique de côté, âgé de 7 jours.

La figure 2 indique les dispositions des divers tas de briques alternés. L'appareil comporte donc dans chaque tas deux briques raccourcies d'un quart. La section transversale du pilier est de 961 cm². Le poids spécifique de la maçonnerie au moment de l'essai était de 2.050 Kg/m³. La hauteur du pilier était de 1,20 m. Il avait été maçonné par un maçon professionnel habile.



Tas impairs. — Tas pairs.

— Fig. 2. —

L'essai a été effectué au moyen d'une presse Amsler de 1000 tonnes travaillant au régime de 200 tonnes. La compression a d'abord été élevée graduellement par paliers de 10 tonnes de 0 à 100 tonnes, puis ramenée de même à 0, ensuite relevée par paliers de 20 tonnes de 0 à la charge de rupture de 184 tonnes. Les déformations étaient mesurées à l'aide de deux comparateurs Stoppani au 1/100 de mm., disposés sur deux faces parallèles du pilier et mesurant sur une base de 870 mm. de longueur initiale. La figure 3 reproduit les

courbes de variation des raccourcissements spécifiques en fonction des tensions. Grâce à la nature des appareils de mesure de déformations employés et à leur fixation, les observations ont pu être poursuivies jusqu'à la rupture. Les courbes relevées ont une allure caractéristique. La première mise en charge indique une déformation quasi linéaire, correspondant à une valeur de E égale à environ 100.000 Kg/cm² dans l'intervalle de tensions 0 à 35 Kg/cm² de compression. La décharge indique une hystérésis importante et une déformation permanente appréciable. La courbe de mise en charge consécutive débute par une partie concave, puis présente un point d'inflexion et change de sens de courbure dans sa partie terminale aboutissant à la rupture. Cette anomalie initiale de courbure peut être due à un phénomène de retard dans la déformation de décharge. Les mises en charge et décharge ont été en effet

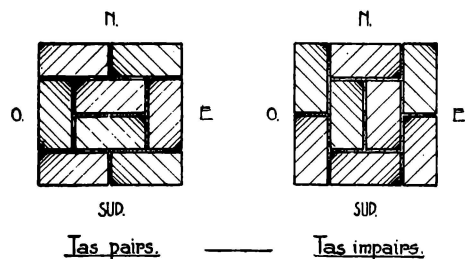


assez rapides (10 Kg/cm² par minute environ) et les lectures faites assez rapidement. Cependant, à partir environ de la moitié de la charge de rupture, il apparut que, pour chaque palier de charge, les déformations augmentaient avec le temps. Les lectures des appareils furent faites lors qu'il semblait que les déformations étaient stabilisées.

Des fissures longitudinales suivant des lignes de joints discontinues traversant les briques, commencèrent à apparaître sous la charge de 180 tonnes. Elles se développèrent rapidement tendant à diviser le pilier en neuf colonnettes d'une demi-brique. Sous la charge de 184 tonnes le pilier s'effondra soudainement (191 Kg/cm²).

IV. — Écrasement d'un pilier de maçonnerie de briques de 2 briques de côté, âgé de 28 jours.

La figure 4 indique les dispositions des divers tas de briques alternés. L'appareil ne comporte que des briques entières. La section transversale du pilier



est 1764 cm². Le poids spécifique apparent de la maçonnerie au moment de l'essai était 2046 Kg/m³. La hauteur du pilier était de 1,205 m. (volume 212,56 dm³, poids 435 Kg).

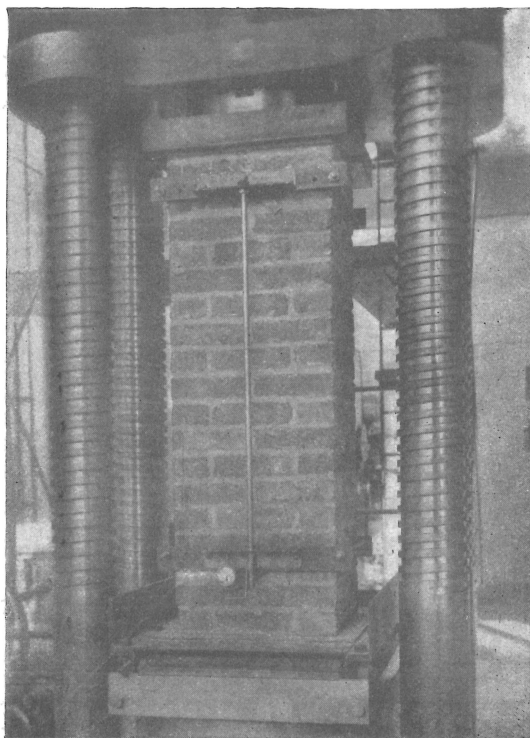
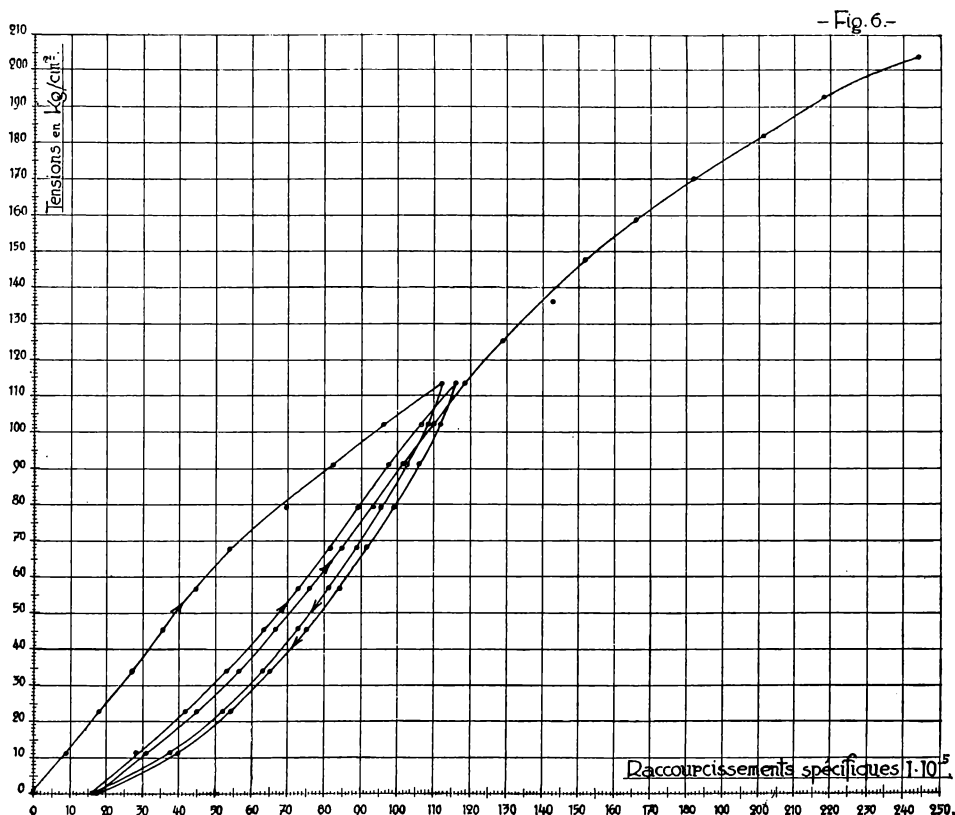


FIG. 5.

Le pilier avait été maçonné partiellement par un maçon professionnel habile ; un élève-conducteur avait posé quelques tas. L'essai a été effectué dans des conditions analogues à celles du pilier précédent ; la longueur de mesure des déformations était de 873 mm. (fig. 5). La machine de 1000 tonnes a été employée au régime de 500 tonnes. Il y a eu deux cycles successifs de mise en charge de 0 à 200 tonnes et retour à 0 par paliers de 20 tonnes, ensuite une mise en charge jusqu'à rupture, par paliers successifs de 20 tonnes.



La figure 6 reproduit les courbes de variation des raccourcissements spécifiques en fonction des tensions. On y remarque l'allure concave des parties initiales des courbes relatives aux deuxième et troisième mises en charge, à comparer à la constatation analogue à la figure 3.

Sous la charge de 320 tonnes (181,4 Kg/cm²), on observe des fissures longitudinales assez fines au milieu des faces orientées Est et Nord, suivant des lignes de joints discontinus et à travers les briques. Les deux fissures s'accroissent davantage sous la charge de 340 tonnes. Sous la charge de 360 tonnes, deux fissures analogues aux précédentes se marquent sur les faces Ouest et Sud. Ensuite deux nouvelles fissures apparaissent aux angles N-O et N-E ; en même temps les déformations croissent rapidement, la charge restant constante. Les appareils de mesure ont été rapidement enlevés et cinq minutes environ après l'application de la charge de 360 tonnes (204 Kg/cm²), le pilier cède brusquement et la charge tombe à 70 tonnes (fig. 7 et 8). La charge continue ensuite à décroître, tandis que le pilier se ruine progressivement (fig. 9). La charge étant enlevée, le pilier s'effondre presque complètement.

Les processus de rupture des deux piliers ont été identiques. Pour des valeurs de charges de compression assez peu inférieures aux charges de rupture, les déformations ont été assez rapidement croissantes en fonction du temps et des fissures longitudinales sont apparues successivement suivant les lignes de joints discontinus, en traversant les briques. En même temps des décollements se sont manifestés dans les joints continus médians perpendiculaires aux pressions, entre les tas de briques. Finalement, les piliers ont paru se fragmenter en colonnettes ayant la section transversale d'une demi-brique et elles se sont effondrées par flambage en commençant

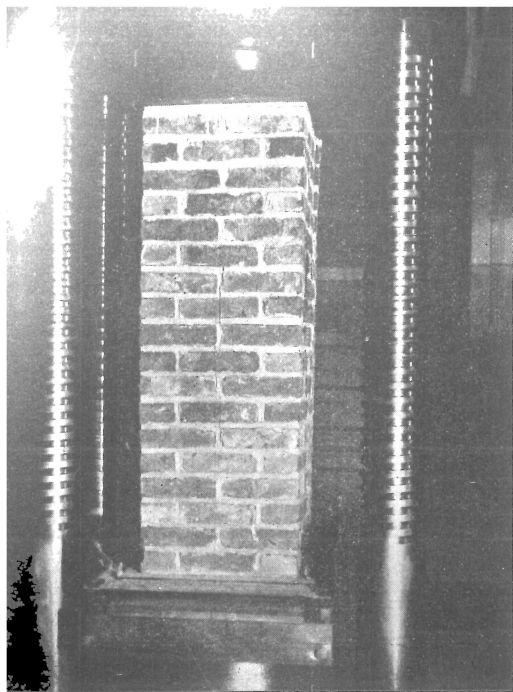


FIG. 7.

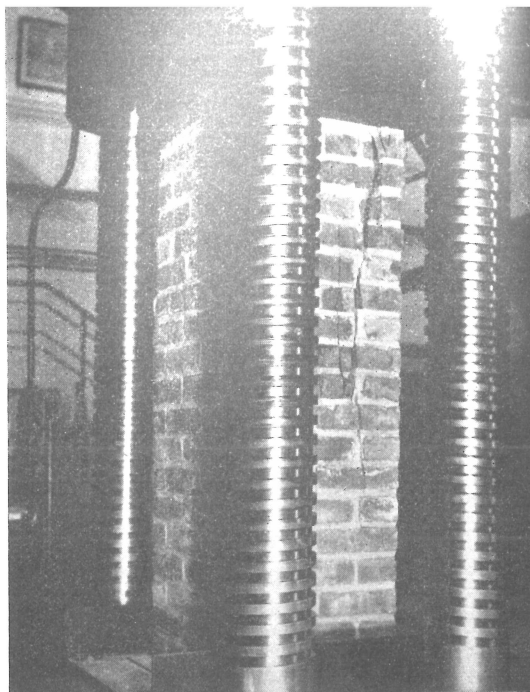


FIG. 8.

par les angles. Après suppression de toute charge, les restes des piliers sont tombés en ruine et on a pu constater une désintégration complète de la partie centrale, les briques étant fragmentées en éclats et en poussière et l'adhérence du mortier étant généralement détruite. La destruction a donc eu un caractère total. La valeur du module d'élasticité entre 0 et 35 Kg/cm² s'élève à environ 129.500 Kg/cm² pour le dernier pilier.

V. — Commentaire.

Il a été indiqué déjà que les essais relatés n'avaient aucun caractère systématique, mais étaient plutôt démonstratifs. En raison des circonstances, les mises en charge ont été assez rapides. Pour cette raison, l'accroissement du raccourcissement en fonction du temps sous tension constante n'a été remarqué que pour les paliers de charges déjà assez élevés; dans ces cas on a attendu que les lectures des appareils parussent stabilisées pour en prendre note.

Cependant, dans l'ensemble, les observations faites sont en bon accord avec celles, en assez petit nombre, qui ont été publiées. Nous citerons la communication faite le 9 novembre 1933 par M. le Professeur H. Rabozée, directeur du Laboratoire d'essais de matériaux de l'Ecole royale militaire de Bruxelles, sous le titre « Essais de résistance de

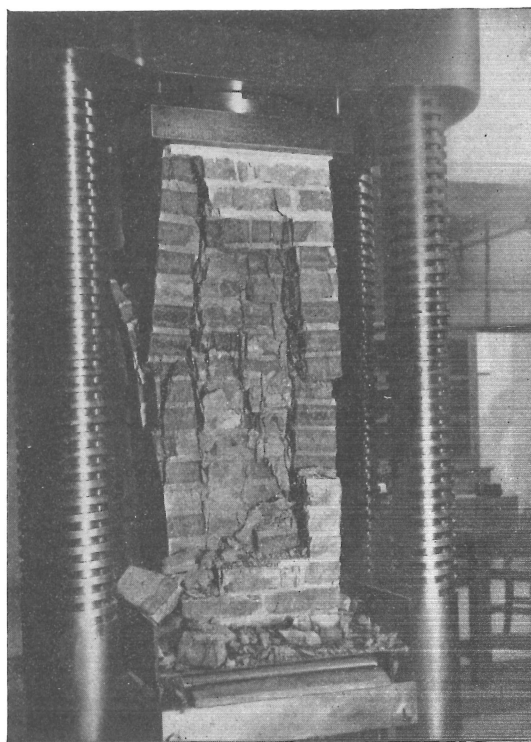


FIG. 9.

massifs en maçonnerie de briques » (39^e séance de l'A. B. E. M.). Cet expérimentateur a rompu quatre piliers de deux briques de côté et de 0,90 m. de hauteur, confectionnés au moyen de quatre mortiers différents et de deux types de briques. Les essais ont eu lieu à six mois d'âge. L'appareil des briques était tout à fait particulier et inusité, de manière à éviter tout joint montant continu. Il était formé en majeure partie de trois-quarts et de moitiés de briques. Le pilier de deux briques de côté essayé à Liège ne contenait que des briques entières. Les conditions expérimentales ont donc été assez différentes. Cependant les résultats et les constatations sont tout à fait analogues et les résistances sont comparables, encore que les conditions de nos essais soient plus défavorables : âge beaucoup moins avancé, piliers plus élevés, appareil moins perfectionné, maçonnerie peut-être moins soignée. Le processus de rupture décrit par M. Rabozée est entièrement concordant avec ce qui est relaté ci-dessus. Pour le second pilier, les fissures sont apparues aussi sous une charge voisine de 90 % de la charge de rupture. Les surfaces de rupture des briques étaient aussi sensiblement planes et parallèles à la direction de l'effort. Il est intéressant de comparer les résultats obtenus à ceux de M. Rabozée.

BRIQUES

R' (Kg/cm ²)	Rf (Kg/cm ²)	Rf : R'	Observations.
709.	107,3	0,151	Ecole militaire.
220.	35,3	0,16	Idem.
437.	45,5	0,104	Liège.

R' représente la compression moyenne de rupture d'une éprouvette formée de deux demi-briques superposées avec joint de mortier, Rf représente la résistance moyenne de flexion d'une brique à plat.

MORTIER

R' (Kg/cm ²)	Rf (Kg/cm ²)	Rf : R'	Observations.
201.	51,6	0,257	Ecole militaire, 28 jours.
142.	47,7	0,336	Idem.
90.	40,6	0,450	Idem.
203.	63,5	0,318	Ecole militaire, 6 mois.
159.	48,2	0,303	Idem.
144.	43,3	0,300	Idem.
162.	29,0	0,180	Liège, 7 jours.
234.	42,90	0,183	Liège, 28 jours.

Rf représente la tension moyenne de rupture à la flexion déterminée sur prismes de 4 × 4 × 16, sur deux appuis distants de 12 cm. et chargés au milieu d'une force concentrée.

R' représente la résistance à la compression, déterminée à l'Ecole militaire sur les deux fragments de l'éprouvette de flexion rompue, sur cubes de 10 cm. de côté au laboratoire de Liège.

MAÇONNERIE

R' ma (Kg/cm ²)	R' ma R' mor	R' ma Rf mor	R' ma R' bri	R' ma Rf bri	Observations.
298.	1,46	4,69	0,42	2,78	Ecole militaire, 6 mois.
205.	0,61	1,96	0,57	3,54	Idem.
272.	1,29	4,25	0,30	1,91	Idem.
125.	1,89	6,28	0,39	2,53	Idem.
191.	1,18	6,60	0,44	4,20	Liège, 7 jours.
204.	0,875	4,75	0,465	4,50	Liège, 28 jours.

E mor	E ma	E : R' ma	Observations.
.	143.600	48,19	Ecole militaire, 6 mois.
.	118.000	57,56	Idem.
.	169.700	62,39	Idem.
.	69.200	55,36	Idem.
.	100.000	52,40	Liège, 7 jours.
206.000	129.500	63,50	Liège, 28 jours.

Les conditions d'expérience de Liège étaient assez différentes de celles de l'Ecole militaire. Les essais, moins nombreux encore que ceux de l'Ecole militaire et moins systématiques, ne pouvaient guère prétendre à préciser les résultats des précédents ni à résoudre les difficultés reconnues par M. Rabozée.

Il semble qu'il faille renoncer, dans l'état actuel de la question, à des règles quantitatives au sujet de la résistance à la compression des piliers en maçonnerie. Ce qui, par contre, semble bien établi par tous les essais, c'est le processus particulier de rupture de ces piliers. Ces conclusions, pour autant qu'elles méritent ce nom, justifient les coefficients de sécurité élevés qui sont usuels pour la résistance pratique des maçonneries. Car, à l'incertitude de la valeur de la résistance ultime effective de la maçonnerie doit s'ajouter la pleine appréciation de l'insécurité afférente au mode de rupture par instabilité latérale des colonnettes produites par la fragmentation des massifs. Ces phénomènes d'instabilité transversale requièrent habituellement des coefficients de sécurité élevés. Ce mode de rupture justifie aussi la pratique du renforcement des maçonneries par des cerclages assez rapprochés, appliquée initialement à des massifs fortement sollicités ou à la consolidation d'ouvrages donnant des signes de faiblesse (lézardes). Certes, ce procédé est empirique et n'est susceptible d'aucun calcul logique dans l'état actuel, mais son opportunité et son efficacité ne peuvent être contestées; elles résultent directement du processus de rupture que le cerclage est propre à contrecarrer directement par une sorte de frettage s'opposant à la déformation transversale.

Il faut noter d'ailleurs que les essais envisagés ne concernent que la compression simple. Or, il est pratiquement impossible de concevoir la rupture des ouvrages réels par ce mode de sollicitation. Pour qu'un massif périsse à son pied par compression simple sous l'effet du poids, il devrait atteindre une hauteur de 500 à 1000 m. Pour réaliser les tensions admissibles les plus élevées de 20 à 30 Kg/cm², il faudrait atteindre la hauteur de 100 à 150 m. et il est clair que, dans ce cas, le danger d'instabilité transversale d'ensemble paraîtra à chacun supérieur à celui de la rupture par compression. Effectivement, les conditions de stabilité des maçonneries ne sont pratiquement jamais régies par le danger de rupture par compression simple, mais bien en général par le danger d'instabilité d'ensemble à la flexion (renversement) ou au glissement, c'est-à-dire d'instabilité transversale. Pour les ouvrages les plus fortement sollicités, tels que les tours, les phares, les cheminées, les voûtes, etc., c'est la raison pour laquelle on ne peut, sans insécurité, dépasser les tensions de 20 à 30 Kg/cm² et, pour la plupart des autres ouvrages, les tensions pratiques sont généralement beaucoup inférieures. M. Rabozée accepte l'hypothèse des expérimentateurs américains, que le mode de rupture des massifs de maçonnerie semble provoqué par la fissuration des briques en flexion. Il semble cependant que l'expansion latérale de la combinaison hétérogène briques-mortier puisse aussi être en cause. Les chiffres précédents indiquent des rapports plus réguliers entre les résistances de la maçonnerie et celles de compression des briques et du mortier que par rapport aux résistances de flexion des mêmes éléments. Cependant, des expérimentateurs américains ont constaté que la résistance des maçonneries serait augmentée en posant les briques sur champ. Il pourrait donc y avoir intérêt, pour cette résistance, à employer des briques de section carrée ou quasi carrée, d'après le module des briques routières (90 × 90 mm. ou 100 × 80 mm.). Seulement, les remarques précédentes montrent que cet accroissement de résistance n'a généralement pas de raison d'être, attendu que la ruine d'un ouvrage par défaut de résistance à la compression paraît improbable.

Beaucoup d'autres causes, indépendantes des actions mécaniques, influent d'ailleurs sur la permanence des maçonneries. Ce sont elles bien plus que les agents mécaniques qui déterminent les conditions de qualité des briques. Les spécifications correspondantes vont d'ailleurs naturellement de pair avec les qualités de résistance mécanique. Le problème qui se pose plutôt est celui d'un emploi économique de la maçonnerie sans insécurité et, dans ce sens, il y a certes des progrès possibles, dans la mesure où d'autres conditions ne s'y opposent pas (esthétiques, architecturales, thermiques, etc.). A titre de simple exemple, citons la tour de la centrale thermo-électrique des nouveaux instituts universitaires du Val-Benoît, à Liège (fig. 10). Cette tour, de 49 m. de hauteur et de section carrée de 5 m. de côté, a des parois en maçonnerie de briques d'une épaisseur uniforme de 36 cm sur toute la hauteur (une brique et demie). Elle renferme un château d'eau de 40 m³, dont le plan d'eau est à 35,50 m. au-dessus du niveau du sol. Elle contient aussi un élévateur à charbon, un ascenseur et d'autres installations techniques. La maçonnerie est armée verticalement et horizontalement; les armatures horizontales, logées dans la maçonnerie, font véritablement office de cerclages. Les parois, fortement évidées, sont solidarisées

et entretoisées tous les 3,54 m. par un plancher en béton armé (fig. 10). Les tensions maxima résultant du calcul dans les hypothèses les plus défavorables s'élèvent à 24 Kg/cm². La maçonnerie est en briques de qualité (format wallon 210 × 100 × 55, résistance moyenne 395 Kg/cm²). Le mortier employé est de composition suivante : 600 Kg de ciment P. A. N. par mètre cube de sable, composé de 2/3 de sable de carrière et de 1/3 de sable du Rhin.

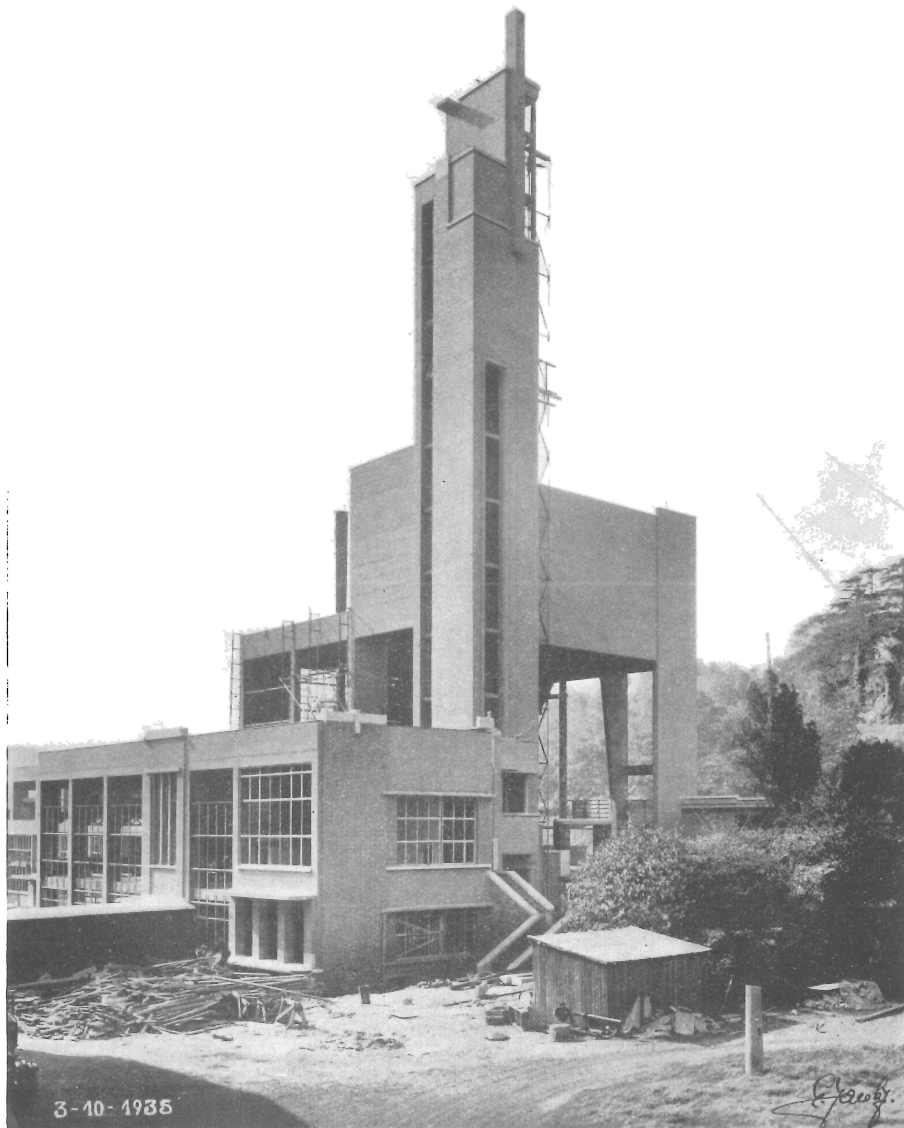


FIG. 10.

Les conditions de résistance à la rupture de cette maçonnerie doivent être assez voisines de celles des piliers essayés. La technique de cette tour sort certes de la norme et vise à un emploi économique de la maçonnerie. On remarque cependant que cela n'a pas pour conséquence une utilisation plus élevée qu'il n'est naturel de la résistance à la compression de la maçonnerie. Les incertitudes qui existent au sujet de cette résistance n'ont donc guère d'inconvénient pratique, pourvu que l'on ait l'assurance qu'elle soit suffisante; elles n'empêchent pas la recherche de l'économie et du progrès.