Contribution à l'étude du béton précontraint

Autor(en): **Bolomey, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **69 (1943)**

Heft 9

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-52512

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

69e année 1er mai 1943 N° 9

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 13.50 francs
Etranger : 16 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 11 francs
Etranger : 13.50 francs
Prix du numéro :
75 centimes.
Pour les abonnements s'adresser à la librairie F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. Neeser, ingénieur, à Genève ; Vice-président : M. Imer, à Genève ; secrétaire : J. Calame, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg :* MM. L. Hertling, architecte ; P. Joye, professeur ; *Vaud :* MM. F. Chenaux, ingénieur ; E. Elskes, ingénieur ; Epitaux, architecte ; E. Jost, architecte ; A. Paris, ingénieur ; Ch. Thévenaz, architecte ; *Genève :* MM. L. Archinard, ingénieur ; E. Martin, architecte ; E. Odier, architecte ; *Neuchâtel :* MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye, ingénieur ; A. Méan, ingénieur ; *Valais :* M. J. Dubuis, ingénieur ; A. de Kalbermatten, architecte.

Rédaction : D. Bonnard, ingénieur, Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Publicité :
TARIF DES ANNONCES
Le millimètre (larg. 47 mm.) 20 cts.
Tarif spécial pour fractions de pages.
En plus 20 % de majoration de guerre.
Rabais pour annonces répétées.
ANNONCES-SUISSES S. A.
5, Rue Centrale,
LAUSANNE
& Succursales.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. Stucky, ingénieur, président ; M. Bridel ; G. Epitaux, architecte ; M. Imer.

SOMMAIRE : *Contribution à l'étude du béton précontraint* (suite), par J. Bolomey, professeur. — *De quelques travaux exécutés récemment par la Société romande d'électricité*, par P. Payot, ingénieur E. I. L., directeur technique. — *Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : Assemblée générale du 26 mars 1943.* — Bibliographie. — Service de placement.

Contribution à l'étude du béton précontraint

par J. BOLOMEY, professeur,
chef de la division des matériaux pierreux du Laboratoire d'essai des matériaux de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne.

(Suite.) [1]

II. Influence de la précompression du béton sur la tenue de poutrelles en béton armé.

Chapitre premier.

Essais sur poutrelles 7 × 7 × 265 cm.

Les essais décrits précédemment ont mis en évidence le grave danger de glissement des fils d'acier tréfilé à haute limite d'élasticité, dès que ceux-ci sont soumis à des tractions de plusieurs t/cm² ; l'effet Hoyer ne suffit pas à assurer une adhérence suffisante et ne peut empêcher les glissements locaux lorsque le béton est fissuré.

Il semble pourtant que des résultats intéressants ont été obtenus par divers expérimentateurs qui n'ont fait intervenir que la simple adhérence de fils de petit diamètre ou qui ont ancré de façon efficace les extrémités de barres de plus gros diamètres.

Il convenait donc de contrôler les résultats obtenus lors des essais d'arrachement directs en entreprenant des recherches sur la résistance à la flexion de poutrelles se rapprochant davantage des conditions du chantier. Ces essais ont été effectués sur des poutrelles de 7 × 7 × 265 cm, armées de fils ronds de 3 mm de diamètre ou de barres carrées de 4 ou 5 mm de côté, tordues ou non.

Le choix de ces dimensions a été dicté par le souci de réaliser des précontraintes importantes du béton, tout en assurant aux barres une longueur d'enrobement suffisante. La grande flexibilité des poutrelles devait en outre faciliter l'observation des déformations de celles-ci.

Caractéristiques du béton. — Béton gradué suivant $P = 10 + 90 \sqrt{d : 15}$ soit :

Ciment Holderbank spécial	390 kg/m²
Ballast roulé 0,1 — 15 mm	1910 »
Eau de gâchage	150 »

Densité = 2,45 Rapport C/E = 2,60.

Consistance permettant la mise en œuvre facile par vibrations.

Résistance à la compression :	3 jours	360 kg/cm²
	7 »	530 »
	28 »	620 »

Module d'élasticité 350 à 410 t/cm² à 28 jours.

Déformations totales sous précontrainte de :

	50 kg/cm²	100 kg/cm²
7 jours . . .	0,14 mm/m[1]	0,22 mm/m[1]
12 » . . .	0,30 »	0,42 »
40 » . . .	0,57 »	0,76 »
70 » . . .	0,63 »	0,92 »
300 » . . .	0,85 »	1,22 »
365 » . . .	0,89 »	1,25 »

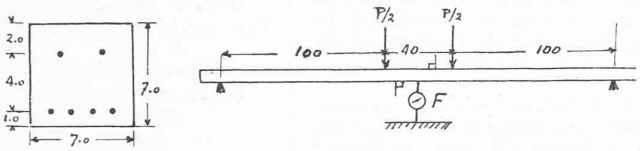
Caractéristiques des aciers.

	rond Ø 3 mm	carré 4/4 mm	carré 5/5 mm
Limite élasticité	190 kg/mm²	132 kg/mm²	42 kg/mm²
R. traction	210 »	148—158 »	45—50 »

[1] Voir *Bulletin technique* du 17 avril 1943, p. 89.

Allongement rupture	1,7 %	7,8—7,3 %	15—12 %
Module élasticité	2150 t/cm²	1900 t/cm²	1950 t/cm²
R. rupture d'une barre	1480 kg	2370—2530 kg	1130—1250 kg

Disposition des armatures et schéma des essais.



$$F^{mm} = 2763\ P^{kg} : E^{t/cm^2} \times I^{cm^4}$$

Suivant les essais, les flèches et les tensions ont été mesurées en d'autres points encore que ceux indiqués sur le schéma.

Mise sous précontrainte des poutrelles à 7 jours, âge aux essais 28-38 jours.

Tensions calculées, $n = 10$.

		Armature		
		6 Ø 3	6 □ 4/4	6 □ 5/5
Béton non fissuré	σbc	0,0168 M	0,0150 M	0,014 M
	σbt	0,0160 M	0,0134 M	0,012 M
	σat	0,112 M	0,090 M	0,080 M
	I	214 cm⁴	246 cm⁴	268 cm⁴
Béton fissuré	σbc	0,029 M	0,022 M	0,019 M
	σat	0,67 M	0,300 M	0,200 M
	I	63 cm⁴	115 cm⁴	150 cm⁴

Lorsque le pourcentage d'acier augmente, la différence entre le taux de travail de l'acier de la poutrelle non fissurée et celui de l'acier de la poutrelle fissurée diminue fortement. C'est-à-dire que les inconvénients d'une fissuration éventuelle s'atténuent dans une large mesure.

Série A. Poutrelles armées de fils ronds de 3 mm diamètre.

(Voir graphique 1)

Les essais ont été effectués sur 5 poutrelles soit :

	Armature	*Ancrage*	*Précontrainte*
A	6 Ø 3 lisses	non ancrés	nulle
B	6 Ø 3 décapés	non ancrés	500 kg/fil
C	6 Ø 3 lisses	ancrés aux extrèmités	950 kg/fil
D	6 Ø 3 décapés	non ancrés	950 kg/fil
E	6 Ø 3 lisses	non ancrés	950 kg/fil

Tous les essais ont été poussés jusqu'à la rupture en observant les flèches, les taux de travail du béton à la compression et à la traction. Pour déterminer ces tensions d'après les déformations observées, le module d'élasticité du béton a été supposé constant et égal à 350 t/cm² aussi bien à la traction qu'à la compression, ce qui ne correspond pas exactement à la réalité.

Pour la poutrelle E les taux de travail du béton et de l'acier ont été mesurés non seulement au milieu de la poutrelle, dans la zone à moment constant, mais également à 70 cm et à 30 cm d'un des appuis.

Les résultats des essais sont reportés sur le graphique 1.

Au cours des essais il a été fait en outre les constatations suivantes :

Poutrelle A. — 6 fils lisses non ancrés et non tendus.

$P =$ 90 kg Apparition de la première fissure et notable augmentation de la flèche ; après la suppression de la charge il reste une flèche permanente de 0,9 mm, ce qui dénote un léger glissement de l'armature.

$P =$ 100 kg Le glissement de l'armature s'accentue.

$P =$ 200 kg La flèche permanente atteint 10 mm.

$P =$ 400 kg La flèche sous charge atteint 77 mm. Après la suppression de la charge il reste une flèche permanente de 17 mm, mais toutes les fissures du béton se referment.

$P =$ 500 kg Flèche sous charge de 103 mm, flèche permanente de 22 mm, une fissure reste visible une fois la charge enlevée. Après avoir remis la charge de 500 kg, la poutrelle se rompt par écrasement du béton.

Poutrelle B. — 6 fils décapés non ancrés, tendus à 500 kg/fil. Précompression initiale du béton tendu de 120 kg/cm².

Avant l'essai, sous l'effet de la précontrainte, la poutrelle a pris une courbure rigoureusement circulaire de 195 m de rayon, la concavité étant du côté des 4 barres tendues. Flèche de 4,4 mm au milieu de la poutrelle.

$P =$ 200 kg Anomalie dans les indications du tensomètre placé sur le béton tendu ; la traction dans le béton diminue légèrement lorsque P augmente. Aucune fissure visible. Lorsque la charge est supprimée, il reste une flèche permanente de 0,5 mm.

$P =$ 250 kg En faisant varier dix fois de suite la charge entre 200 et 250 kg, la flèche pour $P = 200$ passe de 8,3 à 11,0 mm, tandis que pour $P = 250$, la flèche passe de 10,1 à 14,4 mm. En même temps les taux de travail du béton à la compression ont passé de 176 à 247 kg/cm² pour $P = 200$ et de 227 à 315 kg/cm² pour $P = 250$. Bien qu'il n'y ait aucune fissure visible, il y a certainement glissement de l'armature tendue, diminution de la précontrainte et relèvement de l'axe neutre.

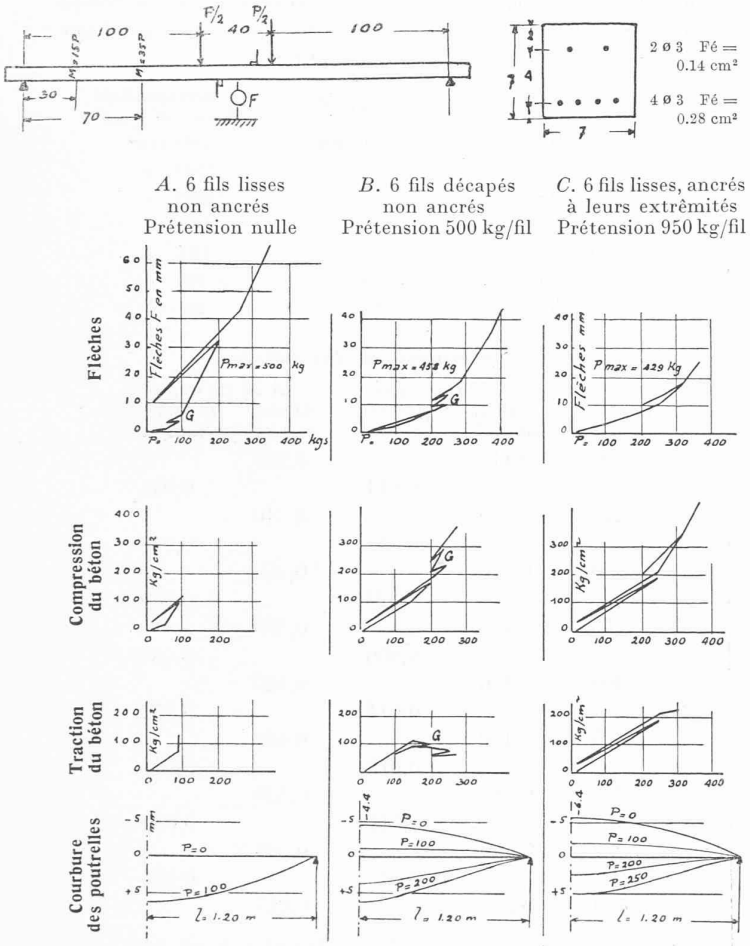
$P =$ 290 kg Observation de plusieurs très fines fissures, à peine visibles.

$P =$ 330 kg Les fissures se sont légèrement ouvertes. Lorsque P est ramené à 10 kg, toutes les fissures se sont fermées. Flèche permanente de 2,4 mm, c'est-à-dire que la flèche initiale de 4,4 mm due à la précontrainte a été réduite à 2,0 mm. La précontrainte n'est donc pas entièrement supprimée.

$P =$ 458 kg Rupture du béton par compression ; peu avant celle-ci la flèche atteignait à peu près 50 mm. Après rupture, la charge étant supprimée, il reste une flèche permanente de 4,5 mm ; toutes les fissures se sont refermées sauf celle au droit du point de rupture qui est juste visible à l'œil nu. La précontrainte a complètement disparu.

Pour $P = 200$, $M = 10\,000$ cm kg, début des désordres, le taux de travail du béton à la traction a été inférieur à $150 - 120 = 30$ kg/cm² ; celui de l'acier à $7100 + 1100 = 8200$ kg/cm² (500 kg : 0,07 = 7100 kg/cm² ; $10\,000 \times 0{,}11 = 1100$ kg/cm²). Au moment de la rupture, la précontrainte ayant disparu, les taux de travail calculés ont été d'environ

Graphique 1 *Essais de poutrelles armées de fil de 3 mm de Ø*



Acier

Lim. élast.	19 t/cm²	CP spec.	390 kg/m³	R. compres.
Rés. tract.	21 t/cm²	Ballast 0,1-15	1910 »	7 j 530 kg/cm²
Allong.	1,7 %	Eau	150 »	28 j 620 »
Mod. élast. Ea = 2150 t/cm²		Densité 2,45		E_b = 350 t/cm²

Béton vibré $P = 10 + 90 \sqrt{d:15}$

Mise sous précontrainte à 7 jours. Age aux essais 35 jours

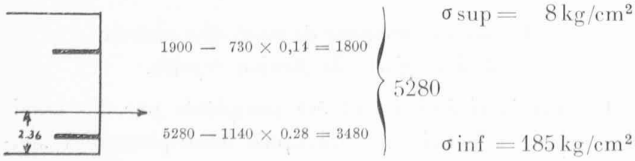
Béton non fissuré I = 214 cm⁴	σbc = 0,0168 M σbt = 0,0160 M σat = 0,112 M	Béton fissuré I = 63 cm⁴	σbc = 0,029 M σat = 0,67 M

660 kg/cm² pour le béton à la compression et de 15 400 kg/cm² pour l'acier à la traction.

Poutrelle C. — 6 fils lisses, ancrés à leurs extrémités, tendus à 950 kg/fil. Précompression initiale du béton tendu de 225 kg/cm².

Avant l'essai, sous l'effet de la précontrainte, la poutrelle a pris une courbure presque rigoureusement circulaire correspondant à un rayon de 128 m, la concavité étant du côté des 4 barres tendues. La flèche au milieu de la poutrelle a passé de 4,2 mm lors de la mise sous précompression du béton à 6,7 mm au moment des essais.

En outre, sous l'influence du retrait et des déformations plastiques et élastiques, la poutrelle s'est raccourcie de 0,25 mm/m¹ à sa partie supérieure et de 0,59 mm/m¹ à sa partie inférieure, soit en moyenne de 0,42 mm/m¹. Le raccourcissement des fils supérieurs a été de 0,34 mm/m¹ et celui des fils inférieurs de 0,53 mm/m¹ correspondant à des chutes de la prétension des aciers de 730 kg/cm² et de 1140 kg/cm².



Du fait de ces déformations inégales le point d'application de la résultante des prétensions est légèrement déplacé vers le haut et la précompression du béton tendu est ramenée de 225 à 185 kg/cm².

La précompression moyenne de 96 kg/cm² dans le béton correspond à une déformation elastique de 96 : 350 = 0,27 mm/m¹. Le raccourcissement total mesuré étant de 0,42 mm/m¹, il reste environ 0,15 mm/m¹ pour le retrait et le raccourcissement plastique.

$P = 250$ kg	Flèche de 10,1 mm. Celle-ci s'accroît à 10,7 mm après maintien de la charge pendant trois heures. P étant ramené à 10 kg, il reste une flèche permanente de 1 mm. Pour $P = 250$, du fait des déformations plastiques du béton comprimé, les raccourcissements de celui-ci passent de 0,56 à 0,63 mm/m¹.
$P = 300$ kg	Désordre dans les indications du tensomètre placé sur le béton tendu.
$P = 310$ kg	Observation des premières fissures dans la zone tendue.
$P = 400$ kg	Les fissures montent le long des faces latérales et s'élargissent.
$P = 429$ kg	Rupture par écrasement du béton, la charge tombe à 310 kg.

Lorsque la charge P a passé de :	La flèche a augmenté de :
50—100 kg	1,80 mm
100—150 »	1,87 »
150—200 »	2,02 »
200—250 »	2,18 »

Dans le cas particulier de charge, la flèche a pour valeur $F^{mm} = 2\,764\,000 \frac{P_{kg}}{EI}$, d'où, si $E = 350\,000$ kg/cm², $I = 7,85 \times \frac{P_{kg}}{F_{mm}}$.

Pour P compris entre	50 et 100 kg	$I = 219$ cm¹
» P »	» 100 » 150 »	$I = 211$ »
» P »	» 150 » 200 »	$I = 196$ »
» P »	» 200 » 250 »	$I = 181$ »

Poutrelle D. — 6 fils décapés, non ancrés à leurs extrémités, tendus à 950 kg/fil. Précompression initiale du béton de 225 kg/cm².

Avant l'essai, sous l'effet de la précontrainte, la poutrelle a pris une courbure rigoureusement circulaire de 100 m de rayon ; contre-flèche au milieu de la poutrelle de 8,6 mm.

$P = 300$ kg Pas de fissure visible, mais désordres dans les indications du tensomètre placé sur le béton tendu. En ramenant la charge de 300 à 10 kg, il reste une flèche permanente de 0,4 mm. En faisant varier 10 fois de suite la charge entre 250 et 300 kg, la flèche pour $P = 250$ passe de 8,8 à 10,3 mm ; celle pour $P = 300$ passe de 11,0 à 12,9 mm. Il y a certainement glissement de l'armature ou fissuration progressive du béton.

$P = 340$ kg Petite fissure visible à la loupe ; elle disparaît complètement lorsque P est ramené à 250 kg.

$P = 350$ kg Observé 6 petites fissures à la partie inférieure de la poutrelle, dans la zone à moment constant.

$P = 420$ kg Les fissures montent à 2 cm de hauteur sur les faces latérales.

$P = 460$ kg Les fissures montent à 4 cm de hauteur sur les faces latérales. Elles se referment complètement lorsque la charge est ramenée à 10 kg. La contre-flèche initiale a passé de 8,6 à 4 mm, c'est-à-dire qu'il reste une flèche permanente de 4,6 mm. La précontrainte a été réduite environ de moitié par suite du glissement de l'armature.

$P = 524$ kg Rupture brusque du béton par écrasement du béton comprimé.

Pour P compris entre	*Augmentation flèche*	*I* (pour E = 350 t/cm²)
50—100 kg	1,56 mm	253 cm⁴
100—150 »	1,73 »	228 »
150—200 »	1,88 »	209 »
200—250 »	2,14 »	184 »
250—300 »	2,19 »	180 »
250—300 »	2,60 »	152 »

Poutrelle E. — 6 fils lisses, non ancrés à leurs extrémités, tendus à 950 kg/fil. Précompression initiale du béton de 225 kg/cm².

Avant l'essai, sous l'effet de la précontrainte, la poutrelle a pris une courbure circulaire régulière de 115 m de rayon ; la contre-flèche au milieu de la poutrelle est de 7,5 mm.

Les tensions dans le béton et l'armature tendue ont été mesurées non seulement dans la zone à moment constant, mais encore à 70 et 30 cm d'un des appuis.

Dès que la charge P a dépassé 250 kg, des irrégularités ont été observées dans l'allongement de l'armature, à 30 et à 70 cm de l'appui, qui se fait par saccades, en même temps que les flèches au milieu de la poutrelle ont augmenté d'une façon anormale, comme indiqué ci-après.

Variation de P	*Augmentation flèche*	*I correspondant* (E = 350 t/cm²)
50—100 kg	1,41 mm	280 cm⁴
100—150 »	1,64 »	240 »
150—200 »	1,81 »	218 »
200—250 »	2,09 »	189 »
250—300 »	2,57 »	154 »
300—350 »	4,50 »	88 »
350—400 »	6,40 »	62 »

Allongements de l'armature.

Charge P	*A 30 cm appui* Allong. mm/m¹	*A 30 cm appui* Différence mm/m¹	*A 70 cm appui* Allong. mm/m¹	*A 70 cm appui* Différence mm/m¹
200	0,111		0,269	
		0,011		0,041
225	0,122		0,310	
		0,011		0,040
250	0,133		0,350	
		0,023		0,040
275	0,156		0,390	
		0,000		0,050
300	0,156		0,440	
		0,014		0,052
325	0,170		0,482	
		0,019		0,048
350	0,189		0,530	
		0,011		0,030
375	0,200		0,560	
		0,033		0,085
400	0,203		0,645	

Ces irrégularités doivent être attribuées à un très léger glissement de l'armature.

$P = 350$ kg Observation de la première fissure.

$P = 400$ kg En ramenant la charge à 10 kg, il reste une flèche permanente de 1 mm.

$P = 450$ kg Observation de 7 fines fissures capillaires se répartissant sur une longueur de 60 cm.

$P = 475$ kg Fort glissement de l'armature à 70 cm de l'appui, son allongement passe de 0,95 à 1,44 mm/m¹ pour une variation de charge de 25 kg (variation du moment fléchissant de 875 cm kg).

$P = 500$ kg Fort glissement de l'armature à 30 cm de l'appui, son allongement passe de 0,267 à 0,810 mm/m¹ pour une variation de charge de 25 kg (variation du moment fléchissant de 375 cm kg).

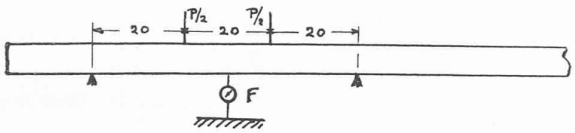
$P = 550$ kg La charge ne tient pas ; glissement par saccades de l'armature à 30 cm de l'appui.

$P = 560$ kg Rupture brusque de la poutrelle par écrasement du béton comprimé.

Essais sur tronçons de poutrelles soumis à des efforts de flexion répétés.

Les essais ci-dessus ont été complétés par des essais de fatigue effectués sur quelques demi-poutrelles sou-

mises à des charges répétées de 1200 kg (soit $M =$ 12 000 cm kg) suivant le schéma ci-dessous.



Poutrelles	Précon-trainte	Nomb. de sollici.	Flèches		
			Totales mm	Perm. mm	Elast. mm
A. fils lisses	0	3900	3,90	0,79	2,11
B. fils décapés . . .	500/fil	4300	1,18	0,08	1,10
D. fils décapés . . .	950/fil	4200	0,79	0,09	0,70
E. fils lisses	950/fil	1	0,72	0,00	0,72
E. fils lisses	950/fil	900	0,91	0 11	0,80
E. fils lisses	950/fil	2250	1,67	0,32	1,35

Dans le cas de charge considéré $F^{mm} = 38\,100 \frac{P}{EI}$ ou, si $E = 350$ t/cm² $I = 0{,}11 \frac{P_{kg}}{F_{mm}}$, ce qui donne :

Poutrelle

A	E=350 t/cm²	P=1200	F=2,11	I= 62	cm⁴
B	E=350 »	P=1200	F=1,10	I=120	»
D	E=350 »	P=1200	F=0,70	I=190	»
E	E=350 »	P=1200	F=0,72 à 1,35	I=186-98	»

Ainsi donc, sous un moment de 12 000 cm kg (correspondant à une charge de 240 kg pour les poutrelles entières), toutes les poutrelles ont accusé des flèches permanentes et élastiques s'accentuant avec le nombre de sollicitations. Le moment d'inertie a été très inférieur à celui calculé pour le béton non fissuré ; pour la poutrelle *A* il a correspondu à celui calculé pour le béton fissuré $n = 10$.

Ces diverses constatations dénotent sûrement un léger glissement des armatures, moins accentué cependant pour les fils décapés que pour les fils lisses.

Remarques sur les essais de poutrelles armées de fils ronds de 3 mm.

a) Toutes les poutrelles ont montré une résistance remarquable à la rupture sous charges statiques.

b) Sous charges répétées elles ont toutes montré des signes de fatigue (flèches permanentes et accroissement des flèches élastiques) s'aggravant avec le nombre de sollicitations. Cette fatigue est due au glissement des armatures dont l'adhérence au béton est insuffisante.

c) La poutrelle avec fils lisses ancrés à leurs extrémités n'a guère montré de supériorité sur celles avec fils décapés non ancrés.

d) Le décapage des fils à l'acide améliore considérablement l'adhérence, mais n'est pas suffisant à lui seul pour des aciers à très haute limite d'élasticité. Il donnera cependant des résultats satisfaisants pour les fils de petits diamètres dont la limite d'élasticité ne dépasse pas 100 kg/mm².

e) La résistance à la rupture n'a guère été modifiée par précontrainte. Le gros avantage de celle-ci est de diminuer considérablement les flèches, de retarder la fissuration du béton ainsi que le glissement de l'armature qui en est la conséquence.

f) Les premières fissures ont été observées :

Poutrelle *A* pour une charge de 90 kg
$M =$ 4 500 cm.kg

Poutrelle *B* pour une charge de 250 à 290 kg
$M =$ 12 500-14 500 cm.kg

Poutrelle *C* pour une charge de 300 à 310 kg
$M =$ 15 000-15 500 cm.kg

Poutrelle *D* pour une charge de 340 kg
$M =$ 17 000 cm.kg

Poutrelle *E* pour une charge de 350 kg
$M =$ 17 500 cm.kg

Les essais de fatigue ont démontré qu'aucune des poutrelles n'aurait pu supporter à la longue des charges répétées de l'ordre de 240 kg, correspondant à un effort de traction de 192 kg/cm² du béton dont la précompression était de 185 kg/cm². La résistance propre du béton à la traction semble avoir disparu.

Série B. Poutrelles armées de barres d'acier carré tordu.

(Voir graphiques 2 et 3)

Le béton précontraint ne peut être utilisé avec succès, s'il est soumis à des charges répétées, que si l'on assure un ancrage suffisant aux barres d'armature sur toute leur longueur et non pas seulement à leurs extrémités.

Les fils de très petit diamètre peuvent donner satisfaction si leur limite d'élasticité ne dépasse pas 100 kg/mm² ; même dans ce cas, la sécurité est faible et il faut craindre des glissements locaux.

L'acier Isteg est excellent mais se prête mal à la précontrainte à cause de la difficulté de le tendre. D'autre part, il ne peut être obtenu avec des aciers à haute limite d'élasticité.

Les barres à section variable ne peuvent être fabriquées avec de l'acier dur.

Ces considérations nous ont amenés à étudier le procédé du brevet Sarrasin, qui consiste à utiliser, pour le béton précontraint, de l'acier carré tordu, de façon à réaliser un ancrage continu des barres, en général de faible section.

Les essais ont été effectués en armant les poutrelles avec de l'acier carré à haute limite d'élasticité, de 4 mm de côté, aimablement mis à la disposition du Laboratoire par les Tréfileries de Bienne, ainsi qu'avec de l'acier carré mi-dur du commerce, de 5 mm de côté.

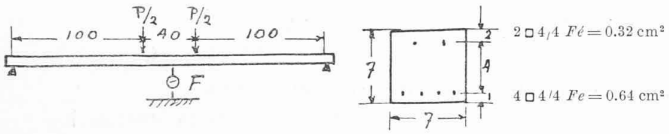
Les caractéristiques du béton et des aciers, la disposition des armatures et le schéma des essais, les tensions calculées en fonction des moments ont été indiquées au début du chapitre premier, pages 101 et 102.

Les essais ont été exécutés sur 6 poutrelles, soit :

Poutrelle	*Armature*	*Ancrage*	*Précontrainte*
F	6 □ 4/4	non tordu, pas de crochets	nulle
G	6 □ 4/4	tordu	nulle
H	6 □ 4/4	tordu	950 kg/barre
I	6 □ 5/5	non tordu, avec crochets	nulle
K	6 □ 5/5	tordu	nulle
L	6 □ 5/5	tordu	950 kg/barre

Graphique 2

Essai de poutrelles armées de 6 barres carrées de 4/4 mm.



Lim. élast. = 13.2 t/cm²
R. tract. = 15.8 t/cm²
Ea = 1900.— t/cm²

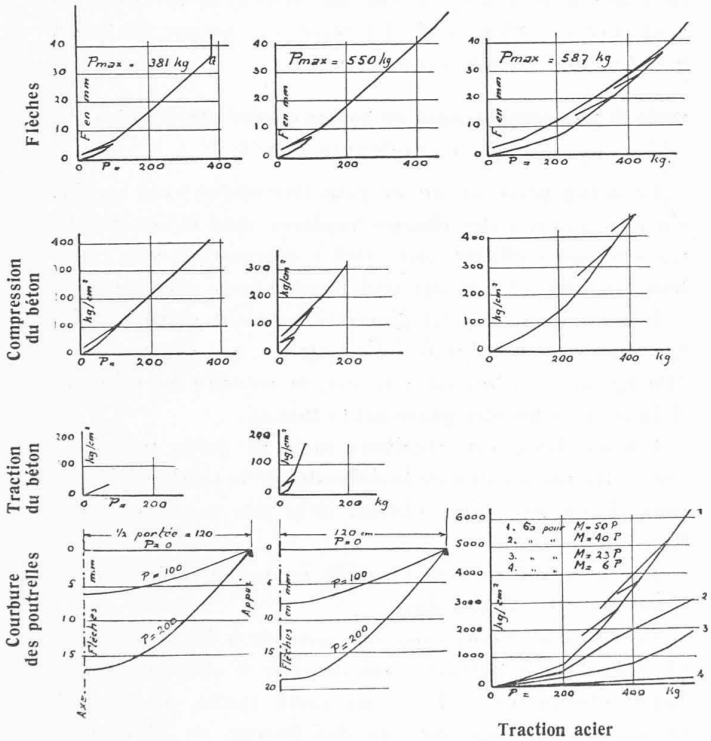
Béton non fissuré { σbc = 0,0150 M, σbt = 0,0134 M, I = 246 cm⁴

Béton fissuré { σbc = 0,022 M, σat = 0,30 M, I = 115 cm⁴

Béton vibré
$P = 10 + 90 \sqrt{d:15}$
Rc 7 = 530 kg/cm²
Rc 28 = 620 »
Eb = 350 t/cm²

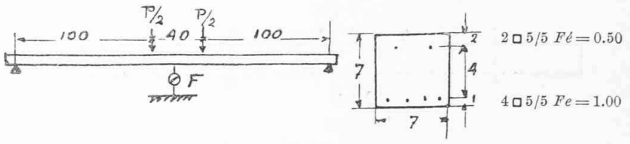
Mise sous précontrainte à 7 jours. Age aux essais = 32 jours

F. 6 □ 4/4 non tordu, Sans précontrainte — *G.* 6 □ 4/4 tordu, Sans précontrainte — *H.* 6 □ 4/4 tordu, Préc. 950 kg/barre



Graphique 3

Essai de poutrelles armées de 6 barres carrées de 5/5 mm.



Lim. élast. = 4.6 t/cm²
R. tract. = 5.2 t/cm²
Ea = 1950.— t/cm²

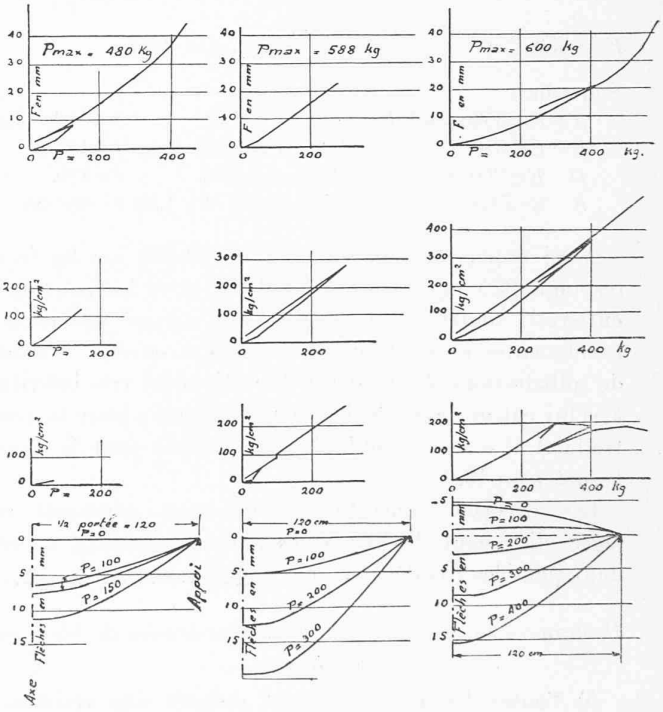
Béton non fissuré { σbc = 0,0140 M, σbt = 0,0120 M, I = 268 cm⁴

Béton fissuré { σbc = 0,019 M, σat = 0,200 M, I = 150 cm⁴

Béton
$P = 10 + 90 \sqrt{d:15}$
R_7 = 530 kg/cm²
Rc 28 = 620 »
Eb = 350 t/cm²

Mise sous précontrainte à 7 jours. Age aux essais = 34 jours

I. 6 □ 5/5 non tordu, Sans précontrainte — *K.* 6 □ 5/5 tordu, Sans précontrainte — *L.* 6 □ 5/5 tordu, Préc. 950 kg/barre



Les résultats obtenus sont reportés sur les graphiques 2 et 3.

Les constatations complémentaires suivantes ont été faites au cours des essais.

Poutrelle F. — 6 □ 4/4 non tordus, pas de précontrainte.

$P = 75$ kg — L'effort de traction dans le béton a atteint son maximum de 38 kg/cm²; il tend ensuite à diminuer lorsque la charge augmente.

Lorsque P a augmenté de 50 à 75 kg, la flèche a passé de 1,8 à 3,5 mm.

Lorsque P a augmenté de 75-100 kg, la flèche a augmenté de 3,5-6,2 mm.

En ramenant la charge à 10 kg, il reste une flèche permanente de 1,6 mm. Il y a donc début de fissuration du béton ou fortes déformations plastiques.

$P = 175$ kg — Première fissure visible.

$P = 250$ kg — 4 fissures réparties sur 45 cm de longueur.

$P = 300$ kg — 11 fissures réparties sur 110 cm de longueur.

$P = 380$ kg — Glissement de l'armature, la charge ne peut être augmentée.

Poutrelle G. — 6 □ 4/4 tordus, pas de précontrainte.

$P = 75$ kg — Désordre dans les indications du tensomètre placé sur le béton tendu, mais pas de fissure visible.

$P = 200$ kg — Pas de fissure visible à la loupe, la poutrelle a une courbure régulière qui coïncide presque exactement avec la parabole $y = x^{1,70} \times 0,00055$ x et y en cm.

$P = 250$ kg — Pas de fissure visible à la loupe.

$P = 300$ kg — 6 fissures à peine visibles.

$P = 450$ kg — 19 fissures à peine visibles, réparties sur une longueur de 110 cm.

$P = 500$ kg — En ramenant la charge de 500 à 10 kg, la flèche tombe de 52,5 à 9,5 mm. En remontant la charge à 500 kg, la flèche totale a augmenté de 1 mm, à 53,5 mm.

$P = 550$ kg Rupture du béton par compression. Pour cette charge les taux de travail calculés sont
$\sigma b = 605$ kg/cm²
$\sigma a = 8250$ »

Poutrelle H. — 6 □ 4/4 tordus. Précontrainte 950 kg/barre, soit 5,9 t/cm².

Avant l'essai, sous l'action de la précontrainte, la poutrelle a pris une courbure en arc de cercle. La contre-flèche a été de 2,9 mm.

En admettant les mêmes raccourcissements que pour la poutrelle *C*, la précontrainte initiale de 5700 kg est tombée à 4830 kg ; son point d'application s'est déplacé de 2,33 à 2,40 cm du bas de la poutrelle, de sorte que la précompression du béton au moment des essais est tombée à 160 kg/cm² au bas et est montée à 4 kg/cm² au haut de la poutrelle.

$P = 200$ kg En ramenant la charge de 200 à 10 kg, il reste une flèche permanente de 0,3 mm. Elle passe à 0,6 mm si la charge est ramenée de 250 à 10 kg.

$P = 300$ kg Observé une fine fissure, elle est à peine visible lorsque la charge est ramenée à 250 kg.

$P = 400$ kg 13 fissures, réparties sur une longueur de 60 cm. Les allongements de l'armature tendue correspondent aux tensions suivantes, si $Ea = 1900$ t/cm² (prétension restante non comprise)

à 100 cm de l'appui	$M = 20\,000$	$\sigma = 3450$ kg/cm²
» 80 » » »	$M = 16\,000$	$\sigma = 1980$ »
» 47 » » »	$M = 9\,400$	$\sigma = 800$ »
» 12 » » »	$M = 2\,400$	$\sigma = 160$ »

$P = 500$ kg 20 fissures, réparties sur une longueur de 110 cm. Les allongements de l'armature tendue correspondent aux tensions suivantes (non compris la prétension) :

à 100 cm de l'appui	$M = 25\,000$	$\sigma = 5100$ kg/cm²
» 80 » » »	$M = 20\,000$	$\sigma = 2600$ »
» 47 » » »	$M = 11\,900$	$\sigma = 1420$ »
» 12 » » »	$M = 3\,000$	$\sigma = 210$ »

$P = 575$ kg Signes de fatigue de la poutrelle, la limite d'élasticité de l'acier est près d'être atteinte. Les tractions supplémentaires dans l'armature dues à la charge *P* sont de :

à 100 cm de l'appui	$M = 28\,750$	$\sigma = 6450$ kg/cm²
» 80 » » »	$M = 23\,000$	$\sigma = 3120$ »
» 47 » » »	$M = 13\,600$	$\sigma = 2000$ »
» 12 » » »	$M = 31\,460$	$\sigma = 250$ »

Pour un module d'élasticité de l'acier de 1900 t/cm² et un raccourcissement de l'armature de 0,53 mm/m¹, la prétension dans l'armature inférieure est tombée de 950 kg : 0,16 cm² = 5900 kg/cm² à
$5900 - 0{,}53 \times 1900 = 4900$ kg/cm²
de sorte que la traction totale des aciers a été, dans la zone à moment constant de
$4900 + 6450 = 11\,350$ kg/cm².

$P = 587$ kg Rupture du béton par compression.

L'ancrage des barres est resté excellent jusqu'au moment de la rupture du béton.

Les tractions supplémentaires dans l'acier dues aux charges *P* décroissent, du milieu de la poutrelle aux appuis, beaucoup plus rapidement que les moments fléchissants, malgré la forte fissuration du béton.

Pour $P = 575$, la différence de taux de travail de l'armature, entre deux points situés à 100 et à 80 cm d'un appui, est de 3330 kg/cm², soit de 530 kg/barre ou encore de $530 : 20 \times 1{,}6 = 16{,}5$ kg/cm² de surface d'acier enrobée. Cette constatation montre la nécessité de l'ancrage continu pour éviter les glissements locaux.

Pour P variant de :	*la flèche a augmenté de :*	*I correspondant si E = 350 t/cm²*
50—100 kg	1,50 mm	263 cm⁴
100—150 »	1,77 »	223 »
150—200 »	1,97 »	200 »
200—250 »	3,31 »	119 »
250—300 »	4,54 »	87 »
300—350 »	4,84 »	81 »
350—400 »	4,90 »	80 »

Ces résultats sont moins bons, pour $P < 350$ kg, que ceux obtenus avec la poutrelle *E* armée de 6 fils lisses de 3 mm de diamètre.

Poutrelle I. — 6 □ 5/5 non tordus, mais avec crochets aux extrémités. Pas de précontrainte.

$P = 50$ kg En réitérant dix fois de suite la variation de charge entre 10 et 50 kg, il reste une flèche permanente de 0,11 mm, la flèche pour $P = 50$ a passé de 1,51 à 1,66 mm.

$P = 125$ kg En ramenant la charge de 125 à 10 kg, il reste une flèche permanente de 2,8 mm.

$P = 150$ kg Observé plusieurs très fines fissures.

$P = 200$ kg Observé 12 fissures réparties sur une longueur de 90 cm.

$P = 250$ kg Observé 21 fissures réparties sur une longueur de 120 cm.

$P = 480$ kg Rupture du béton comprimé.

Poutrelle K. — 6 □ 5/5, tordus, sans crochets, sans précontrainte.

$P = 50$ kg En réitérant la variation de charge entre 10 et 40 kg, il reste une flèche permanente de 0,7 mm, tandis que la flèche pour $P = 50$ passe de 2,15 à 2,31 mm.

$P = 100$ kg En réitérant dix fois de suite la variation de charge entre 10 et 100 kg, il reste une flèche permanente de 2,1 mm, tandis que pour $P = 100$ la flèche passe de 5,7 à 6,2 mm.

$P = 175$ kg Observé une petite fissure à peine visible.

$P = 250$ kg Observé plusieurs fissures capillaires, à peine visibles.

$P = 500$ kg La poutrelle, bien que fortement fissurée, a une courbure régulière qui coïncide presque exactement avec la parabole $y = x^{1,70} \times 0{,}0012$; *x* et *y* en cm.

Pour $P = 300$ la courbure a pour équation $y = x^{1,70} \times 0{,}00058$.

$P = 550$ kg Observé 30 fissures également réparties sur une longueur de 150 cm.

$P = 588$ kg Rupture du béton par compression. Pour cette charge les formules du béton fissuré $n = 10$ donnent des taux de travail
$\sigma b = 560$ kg/cm² $\sigma a = 5900$ kg/cm².
La limite d'élasticité de l'acier a été dépassée, ce qui a entraîné la rupture du béton à la compression.

Poutrelle L. — 6 □ 5/5 tordus. Précontrainte 950 kg/barre, soit 3,8 t/cm².

Avant l'essai, sous l'action de la précontrainte, la poutrelle a pris une courbure en arc de cercle de 225 m de rayon. La contre-flèche a été de 3,8 mm.

En admettant les mêmes raccourcissements que pour la poutrelle *C*, la prétension est tombée au moment des essais à $950 - 0{,}25 \times 0{,}34 \times 1920 = 790$ kg pour les barres supérieures et à $950 - 0{,}25 \times 0{,}53 \times 1920 = 750$ kg pour les barres inférieures. La précontrainte initiale est tombée de 5700 à 4380 kg, son point d'application s'est déplacé de 2,33 à 2,44 du bas de la poutrelle, de sorte que la précompression du béton au moment des essais a été de 131 kg/cm² au bas de la poutrelle et de 7 kg au haut de celle-ci.

$P = 200$ kg En ramenant la charge à 10 kg, il reste une flèche permanente de 0,5 mm due aux déformations plastiques.

$P = 250$ kg En ramenant la charge à 10 kg, il reste une flèche permanente de 0,8 mm.

$P = 300$ kg En ramenant la charge à 10 kg, il reste une flèche permanente de 0,9 mm.

Après avoir fait varier dix fois de suite la charge entre 250 et 300 kg, la flèche pour $P = 250$ a passé de 9,6 à 10,8 mm ; celle pour $P = 300$ a passé de 12,6 à 13,1 mm.

A partir de $P = 325$ kg l'effort de traction du béton tendu a atteint son maximum de 203 kg/cm². Il se maintient sensiblement constant, même si la charge est poussée à 500 kg. Il tombe à 11 kg/cm² si la charge est ramenée à 10 kg.

$P = 350$ kg Aucune fissure visible, mais troubles dans les indications du tensomètre placé sur le béton tendu.

$P = 400$ kg Observé 9 fines fissures, réparties sur une longueur de 50 cm.

$P = 500$ kg Observé 14 fissures réparties sur une longueur de 90 cm.

$P = 600$ kg Observé 22 fissures réparties sur une longueur de 110 cm. La flèche augmente progressivement de 46 à 56 mm. Après maintien de la charge pendant 10 minutes, la poutrelle se rompt par écrasement du béton, consécutif au dépassement de la limite d'élasticité de l'armature.

Pour variation de P de :	*la flèche a augmenté de :*	*I correspondant* $Eb = 350$ t/cm²
50—100 kg	1,62 mm	243 cm⁴
100—150 »	1,64 »	241 »
150—200 »	2,18 »	181 »
200—250 »	2,60 »	152 »
250—300 »	3,02 »	130 »
300—350 »	2,96 »	133 »
350—400 »	3,04 »	130 »

Remarques sur les essais de poutrelles armées d'acier carré.

a) Toutes les poutrelles armées avec de l'acier carré tordu ont montré une résistance remarquable sous charges statiques. Par contre celles armées avec de l'acier carré non tordu (*F* et *I*) ont péri prématurément par suite du glissement des armatures. Les crochets de la poutrelle *I* ont eu un effet utile, nullement comparable cependant à celui de l'ancrage continu de l'acier tordu.

b) Les résistances à la rupture ont été sensiblement les mêmes pour les poutrelles armées de barres carrées tordues de 4 ou 5 mm de côté, précontraintes ou non. Elles ont été légèrement supérieures à celles des poutrelles armées d'acier rond de 3 mm.

c) Toutes les ruptures ont eu lieu par écrasement du béton ; toutefois les poutrelles *H* et *L* précontraintes ont montré, peu avant de céder, des signes de fatigue attribuables pour la poutrelle *H* à la détorsion et au glissement de l'armature tendue, pour la poutrelle *L* au dépassement de la limite d'élasticité du métal.

d) Les premières fissures ont été observées sous des charges *P* de :

F □ 4/4 non tordu,	sans précontrainte . . .	175 kg
G □ tordu	sans précontrainte . . .	300 »
H □ 4/4 tordu	précontrainte 950/barre.	300 »
I □ 5/5 non tordu,	sans précontrainte . . .	150 »
K □ 5/5 tordu	sans précontrainte . . .	175 »
L □ 5/5 tordu	précontrainte 950/barre.	400 »

Il est certain qu'une fissuration restée invisible, mais décelée par les tensomètres ou par la diminution du moment d'inertie, s'est produite sous des charges bien plus faibles. Les flèches permanentes observées dès le début des essais peuvent être attribuées aux déformations plastiques du béton et, pour les poutrelles non précontraintes, à la détente des armatures que le retrait du béton avait comprimées.

e) Contrairement à ce qui se produit habituellement pour les pièces fléchies en béton armé ordinaire, le nombre des fissures capillaires a augmenté progressivement avec la charge, sans qu'aucune d'elles se soit fortement ouverte et sans qu'il se soit produit des jarrets dans les courbes des déformations ou des tensions. Il a été ainsi très difficile de déceler l'instant précis où la première fissure s'est ouverte.

Les fissures sont nombreuses, mais à peine visibles tant qu'il n'y a pas glissement ou dépassement de la limite d'élasticité du métal ; elles se referment et disparaissent complètement lorsque la charge est enlevée. Elles s'observent en premier lieu à la face inférieure des poutrelles et montent progressivement sur les faces latérales, au fur et à mesure que la charge augmente.

Cette particularité, qui a été observée sur toutes les poutrelles tant que l'armature n'a pas nettement glissé, doit être attribuée à l'emploi de barres de petits diamètres qui leur assurent un ancrage continu sous charges statiques. Inversement, lorsque dans une poutre de béton armé il se produit une fissure non élastique, qui n'est pas attribuable au simple retrait, il est permis d'en déduire qu'il s'est produit un glissement local de l'armature ou que la limite d'élasticité de celle-ci a été dépassée.

f) La précontrainte n'a pas modifié de façon appréciable la résistance à la rupture des poutrelles ; par contre, elle a diminué considérablement les déformations (flèches) sous charges modérées et retardé l'apparition des premières fissures.

g) Pour le béton non précontraint, l'acier carré tordu provoque, sous faibles charges, des déformations plus grandes que l'acier carré non tordu. Ceci est attribuable aux compressions initiales de l'armature, dues au retrait auquel s'oppose violemment l'acier tordu ; elles sont moins fortes pour l'acier lisse non tordu sur lequel le jeune béton, encore peu adhérent, peut légèrement glisser. Le même phénomène s'observe d'ailleurs lors de l'emploi d'acier Isteg. Sous charges plus élevées, l'armature lisse commence à glisser, ce qui entraîne une augmentation rapide des flèches et diminue la résistance finale.

h) A égalité de charge, les poutrelles précontraintes armées de barres d'acier carré tordu de 4 et 5 mm de côté accusent en général des flèches un peu plus faibles que celles armées de fils d'acier rond de 3 mm de diamètre. Les différences s'accentuent pour les fortes charges (béton fissuré) à cause des différences de sections des armatures (0,42, 0,96, 1,50 cm²) et à cause du glissement des fils ronds.

i) Les commentaires des essais de la poutrelle *H* indiquent que sous charge de 575 kg ($M = 28\,750$ cm/kg) l'effort de traction dans les barres tendues (prétension initiale non comprise) a varié de 6450 à 3120 kg/cm² entre 1,00 et 0,80 m de distance de l'appui, soit sur une longueur de 20 cm. Cela dénote un ancrage très efficace de l'acier carré tordu, mais aussi un taux de travail élevé du béton au cisaillement sous la pression des faces obliques des barres tendues.

Chapitre II.

Essais sur poutrelles de 7 × 15 × 265 cm et 10 × 15 × 265 cm.

Les essais du chapitre premier ont été effectués sur des poutrelles de faibles sections, très flexibles, avec pourcentages d'armatures élevés, compris entre 0,85 et 3,00 % de la section de béton ; en outre la précompression initiale du béton a dépassé 200 kg/cm². Les ruptures ont été provoquées, sauf pour les poutrelles *K* et *L*, par le glissement de l'armature ou par l'écrasement du béton.

Il convenait de reprendre les essais sur des poutrelles plus rigides, soumises à une précompression initiale du béton moins élevée, de façon à obtenir, si possible, la rupture de l'armature tendue.

La plus grande rigidité devait en outre permettre des essais au pulsateur sur des demi-poutrelles.

Caractéristiques du béton, gradué suivant $P = 10 + 90\sqrt{d:15}$.

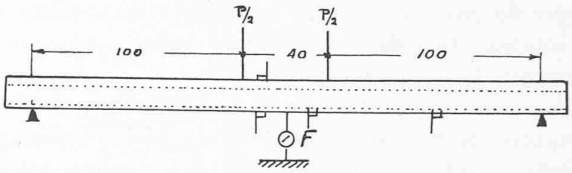
Poutrelles M.N.O.P.Q.U.V.X.Y.		*Poutrelles R.S.T.*	
Holderbank spécial	390 kg/m³	Cim. alumineux	260 kg/m³
Ballast roulé 0,1-15 mm	1910 »	Ballast	2025 »
Eau de gâchage	150 »	Eau de gâchage	155 »
Densité	2,45	Densité	2,44
Rapport *C/E*	2,60	Rapport *C/E*	1,68

R. compression à :		R. compression à :	
3 jours	360 kg/cm²	2 jours	480 kg/cm²
7 »	530 »	4 »	605 »
28 »	620 »		
Eb à 28 jours	350—410 t/cm²	Eb à 4 jours	350 t/cm²

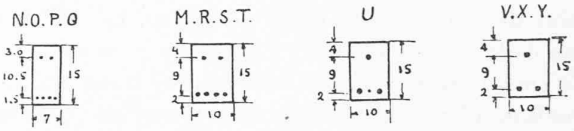
Caractéristiques des aciers.

Poutrelles :		Rond Ø 3 mm *M.N.*	Carré 4/4 mm *R.S.T.*	Carré 5/5 mm *O.P.Q.*	Rond Ø 5 et 10 mm *U.*	Carré 10/10 mm *V.X.Y.*
Limite élaste.	t/cm²	19,0	13,2	4,2	3,5	4,0
R. traction	»	21,0	15,8	5,0	4,1	4,3
Ea	»	2150	1900	1950	2150	2100
R. rupture par barre	kg	1480	2530	1250 800	3200	4300

Schéma des essais et disposition des armatures. Essais statiques.



$$F_{cm} = 276\,400\,\frac{P}{E\,I} \quad \text{si } E = 350 \text{ t/cm}^2,\ I^{cm^4} = 7{,}85\,\frac{P_{kg}}{F_{mm}}$$



Mise sous précontrainte à 7 jours, sauf pour les poutrelles *R.S.T.*, pour lesquelles elle a eu lieu à 2 jours.

Age aux essais 30 à 42 jours, sauf pour les poutrelles *R.S.T.* pour lesquelles il a été de 4 jours.

Tensions calculées $n = 10$. Taux de travail en kg/cm²
moments . . . en cm kg.

Béton non fissuré.

Poutrelles	N	M	R. S. T.	O. P. Q.	U.	V. X. Y.
Armature	6 Ø 3	6 Ø 3	6 □ 4/4	6 □ 5/5	1 Ø 5 +3 Ø 10	3 □ 10/10
Section	7×15	10×15	10×15	7×15	10×15	10×15
$\sigma_{bc} = M \times$	0,0036	0,0026	0,0025	0,00325	0,0023	0,00225
$\sigma_{bt} = M \times$	0,0035	0,0025	0,0024	0,00300	0,0021	0,00202
$\sigma_{at} = M \times$	0,028	0,018	0,0175	0,0237	0,015	0,0145
I cm⁴	2100	2910	3025	2410	3420	3500

Béton fissuré.

Armature	6 Ø 3	6 Ø 3	6 □ 4/4	6 □ 5/5	3 Ø 10	3 □ 10/10
Section	7×15	10×15	10×15	7×15	10×15	10×15
$\sigma_{bc} = M \times$	0,0080	0,0065	0,0048	0,0048	0,0032	0,00325
$\sigma_{at} = M \times$	0,286	0,275	0,132	0,086	0,050	0.045
I cm⁴	372	385	720	1031	1540	1700

A mesure que le pourcentage d'armature augmente, les différences entre les taux de travail de l'acier tendu de la poutrelle fissurée et ceux de la poutrelle non fissurée s'atténuent notablement, c'est-à-dire que les inconvénients d'une fissuration éventuelle diminuent.

(A suivre.)