Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 69 (1943)
Heft: 14

Artikel: Le béton précontraint: principes, matériaux et procédés
Autor: [s.n.]
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-52519

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: 07.12.2025

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

69e année — 10 juillet 1943 — N° 14

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

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.

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 : *Le béton précontraint. Principes, matériaux et procédés*, par A. Stucky, ingénieur-conseil, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne. — *Société Suisse des ingénieurs et des architectes : Rapport de gestion pour l'année 1942* (suite et fin). — Bibliographie. — Service de placement.

Le béton précontraint.
Principes, matériaux et procédés.

Note de la Réd. *Poursuivant notre série de publications relatives au béton précontraint, nous sommes heureux de soumettre aujourd'hui à nos lecteurs le texte d'un exposé que fit récemment M. le professeur* A. Stucky, *ingénieur-conseil, en guise d'introduction à une discussion lors d'une rencontre qui réunit récemment à Lausanne un certain nombre d'ingénieurs s'intéressant aux questions du béton.*

On entend quelquefois dire que la précontrainte des ouvrages consiste tout simplement à tendre au préalable les aciers *du béton armé*, pour qu'ils abandonnent ensuite leur effort au béton en le comprimant. Sous cette forme lapidaire, cette définition est insuffisante et même fausse. Il convient donc tout d'abord de préciser exactement ce que l'on entend, du point de vue technique, par *mise en précontrainte du béton.*

En réalité, il s'agit de soumettre les constructions, avant l'application des charges extérieures, à un *système de forces permanentes* créées artificiellement qui, combinées aux contraintes résultant des charges, donnent des états de contrainte que les matériaux peuvent supporter *indéfiniment* et en toute sécurité, sans risque de fissuration.

Ces efforts artificiels sont généralement des compressions centrées ou excentrées, obtenues au moyen de vérins ou de fils d'acier tendus, puis relâchés, qui agissent comme des ressorts sur le béton à précomprimer.

On doit insister dans cette définition sur le fait que les matériaux doivent pouvoir supporter les contraintes *indéfiniment* et en toute sécurité, sans aucun risque de fissuration.

Ce système de forces n'est donc pas arbitraire, mais doit être au contraire fixé en fonction des charges, cela va sans dire, mais aussi en *fonction des matériaux*, du béton spécialement et en *fonction du mode d'application.* Il s'agit donc d'une opération bien définie dont les principes ont été précisés pour la première fois par M. Freyssinet.

Une poutre droite en béton reposant sur deux appuis ne satisfait pas à notre définition, puisqu'elle est soumise à des fatigues de traction qu'elle est incapable de supporter *indéfiniment*, même si elles sont faibles.

Le béton armé a résolu provisoirement la difficulté par l'introduction d'armatures en acier. Rappelons en quelques mots le mécanisme du béton armé, bien qu'il soit connu de chacun.

Au début, lorsque les sollicitations de flexion sont petites, l'acier et le béton s'allongent ensemble, se partageant l'effort de traction au prorata du produit de leur section par leur module. Dans cette phase, si les pourcentages d'acier sont faibles, le béton supporte pratiquement tout l'effort. Mais dès que la contrainte du béton atteint une certaine valeur, elle cesse de croître : le béton subit un étirage sous charge constante ; l'acier supporte seul l'augmentation de la traction. Pour un certain taux d'allongement de l'acier, le béton ne peut plus s'allonger sans se rompre et la contrainte de traction du béton diminue rapidement ; le béton se fissure pour

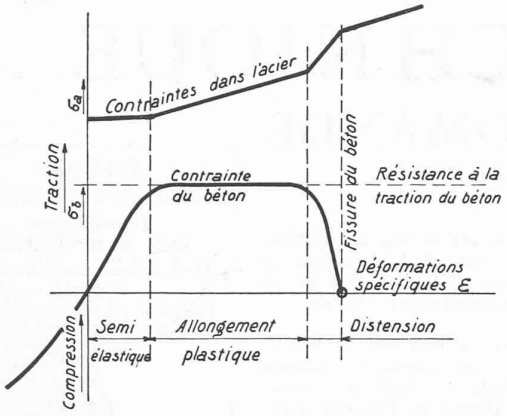

Fig. 1. — Mécanisme du béton armé dans les zones tendues.

une valeur de la contrainte dans l'acier très inférieure à la contrainte de rupture. (fig. 1.)

Or, si dans le calcul du béton armé à la flexion, on ne fait pas appel théoriquement à la résistance du béton tendu, on doit cependant éviter la formation de fissures qui affaiblissent la pièce et risquent, à la fois, d'amener la destruction progressive des armatures en facilitant l'accès de l'eau et des gaz nocifs.

Le seul moyen pratique appliqué jusqu'ici pour combattre la fissuration consiste à calculer les sections des aciers de telle sorte que leurs allongements sous l'effet des contraintes restent inférieurs à ceux qui provoquent la fissuration du béton.

Cette règle impérative *fixe aux contraintes du métal des limites très inférieures à celles qui pourraient être admises* si l'on n'avait égard qu'à sa résistance propre. Nous nous trouvons donc ici en présence d'un obstacle qui entrave tout progrès dans l'utilisation des aciers de haute qualité que la métallurgie peut nous procurer pour un prix de revient qui n'est pas très supérieur à celui des aciers courants. Bref, *dans le béton armé, l'acier est mal utilisé.*

L'utilisation du béton comprimé n'est pas meilleure. Pour s'en rendre compte, il suffit de tracer le diagramme des efforts d'une dalle pleine armée. Comme on le sait, on admet qu'une partie seulement, souvent limitée au quart supérieur de la dalle, participe à la résistance, alors que les efforts sont engendrés par le poids total.

L'étude de l'état de contrainte dans le voisinage des appuis montrerait également que le béton est soumis à des efforts de traction obliques relativement importants, qu'il n'est pas capable de supporter indéfiniment sans dommage.

La répétition des charges ou les vibrations aggravent encore les conditions de résistance que nous venons d'étudier. Si après avoir chargé une poutre, on la décharge un grand nombre de fois, on constate que les charges supportées la première fois sans désordre ni fissuration amènent la rupture du béton tendu après un certain nombre d'alternances. Si celles-ci sont nombreuses et rapides, la charge de fissuration peut s'abaisser au quart de celle qui serait nécessaire pour provoquer la rupture par une application unique[1].

Rappelons enfin que le retrait du ciment, en raccourcissant le béton par rapport à ses armatures, y provoque un ensemble de tractions qui s'ajoutent à celles qui proviennent des charges extérieures. Malgré ces défauts si apparents, le béton armé a déjà fait une brillante carrière. L'expérience a démenti en partie les prévisions pessimistes du début, à cause des propriétés très particulières des bétons de ciment utilisés aujourd'hui ; car aux approches de la rupture, au lieu de se briser, le béton cède plastiquement jusqu'à ce que des armatures, ou du béton moins sollicité, viennent le soulager.

C'est pour les diverses raisons rappelées ci-dessus que les constructeurs ont été amenés à *corriger les états de contrainte peu adaptés aux qualités naturelles du béton, par l'introduction d'un système des forces artificielles.* Ainsi, en comprimant une poutre suivant son axe (fig. 2) soit

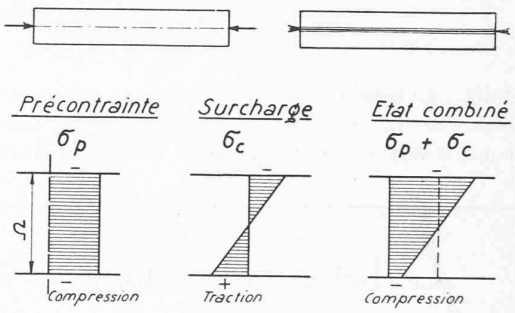

Fig. 2. — Flexion simple et précontrainte centrée. Lorsque l'ouvrage est en service la fibre supérieure est exagérément comprimée.

par des vérins extérieurs, soit par des armatures prétendues, puis relâchées, on peut obtenir un ouvrage dont le béton ne travaille qu'à la compression, c'est-à-dire *d'une manière homogène.* La précontrainte a conféré au matériau des qualités nouvelles. En particulier, et dans l'hypothèse — dont nous verrons qu'elle est fausse — que le résultat obtenu et illustré par ce schéma se maintiendra *indéfiniment*, l'opération se solde par un avantage appréciable, le béton est, provisoirement, à *l'abri de toute fissuration* et l'armature peut travailler à une contrainte mieux proportionnée à sa résistance propre. La précontrainte axée n'est cependant pas rationnelle, car elle augmente inutilement la contrainte sur l'arête supérieure.

On voit immédiatement qu'en déplaçant le centre d'action de la compression vers le bas, on obtiendra l'avantage recherché, c'est-à-dire une précompression σ_p dans la zone inférieure suffisante pour éviter toute fissuration, toutefois sans augmenter inutilement la compression sur l'arête supérieure.

Pareille opération, plus judicieuse que la précédente, sera *moins onéreuse.* En effet, dans le premier cas la

[1] Voir « Travaux » Nov. 1941. *E. Freyssinet.* « Une révolution dans l'art de bâtir ».

force de précompression due à des vérins extérieurs ou à des armatures était de

$$\Omega \, . \, \sigma_p.$$

dans le deuxième cas, elle n'est que de

$$\frac{1}{2} \, \Omega \, \sigma_p.$$

La disposition excentrique des armatures présente encore l'avantage d'augmenter la résistance à la rupture grâce au plus grand bras de levier (fig. 3).

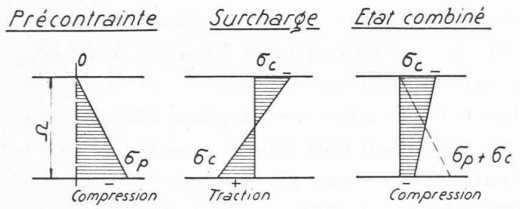

Fig. 3. — Flexion simple et précontrainte non centrée. La compression de la fibre supérieure n'est pratiquement pas augmentée par la précontrainte.

Il s'agit donc de choisir dans chaque cas et en fonction des charges imposées, un système de forces artificielles adéquat et économique.

Ces forces ne sont pas nécessairement dues à des armatures précontraintes. Si l'on dispose de points d'appui, on peut recourir à des vérins. C'est d'ailleurs un procédé basé sur le même principe que M. Freyssinet a appliqué le premier, si nous ne faisons erreur, en 1916, au décintrage de la voûte non armée de 96 m d'ouverture et de 15,50 m de flèche du pont de Villeneuve sur le Lot. Toutefois, l'emploi d'armatures reste généralement la solution la plus pratique et la plus sûre, puisqu'elle supprime toutes les sujétions imposées par des appuis extérieurs.

L'exécution en béton précontraint du radier du barrage des Portes de Fer en Algérie, est une application intéressante de ce principe très général : Le radier est exécuté en deux parties séparées par un espace suffisant pour former le joint de clavage et reliées entre elles par des armatures, rendues non adhérentes au béton sur la plus grande partie de leur longueur. On intercale dans ce joint un ou plusieurs vérins d'un type spécial imaginé par M. Freyssinet, permettant d'exercer aisément des forces considérables.

Ces vérins sont constitués en principe par des capsules déformables que l'on remplit d'un liquide sous pression dont on peut régler à volonté le point de solidification ; lorsque l'effort désiré est appliqué, on bourre le reste du joint avec du béton. (fig. 4).

Ces principes sont susceptibles de nombreuses variantes que l'on peut adapter aux conditions imposées à chaque ouvrage particulier.

Dans tous les cas, ce qui est capital pour la réussite du procédé, c'est *que la précontrainte soit toujours suffisante pour éviter la présence de tractions dans le béton.*

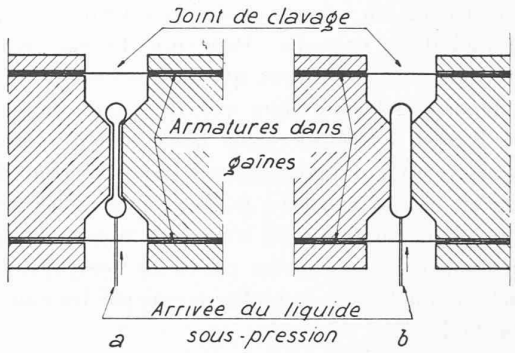

Fig. 4. — Vérin capsulaire : *a*) au repos ; *b*) en action.

C'est ici qu'intervient un autre phénomène : à la longue, la précontrainte se perd partiellement, car, avec le temps, *le béton comprimé subit*, à part une déformation élastique réversible, *une déformation plastique appelée fluage.* (fig. 5).

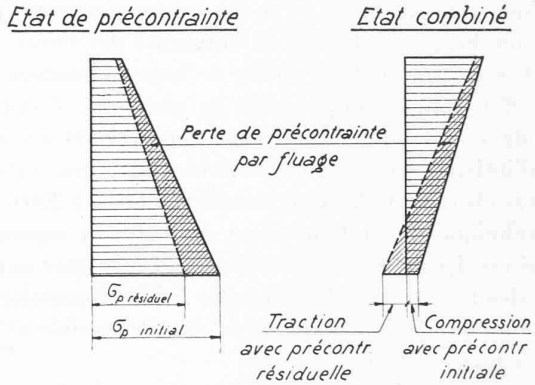

Fig. 5. — Effet du fluage sur l'état de précontrainte : *a*) état de précontrainte ; *b*) état combiné avec l'effet des charges.

La précontrainte initiale σ_{p_0} qui primitivement était suffisante pour que la contrainte résultante provenant des charges extérieures $\sigma_{p_0} - \sigma_c$ soit encore une compression, diminue par l'effet du fluage, de sorte qu'au bout d'un certain temps, cette contrainte résultante peut devenir une traction : l'ouvrage aurait alors perdu les qualités que lui conférait la précontrainte.

L'idée de la précontrainte était déjà contenue, mais sous une forme peu précise, dans les brevets Kœnen de 1909 ; on n'avait alors aucune connaissance du « fluage », de sorte que les qualités des poutres ainsi traitées disparaissaient peu à peu ; c'est pourquoi l'on abandonna le procédé.

Le mérite de M. Freyssinet consiste en ce qu'il a reconnu le phénomène du fluage et que, le premier, il a calculé le système des forces de précontrainte pour que, même après fluage, les efforts de traction soient éliminés *avec certitude.* Ses premiers brevets français datent de 1928. En 1929, ils étaient accordés aussi par le « Patentamt » allemand ; M. Freyssinet, par sa nouvelle notion du fluage du béton, qui met en lumière la nécessité d'en tenir compte

dans le calcul du dispositif de précontrainte, apporta une contribution nouvelle. Pour que la précontrainte subsiste indéfiniment, il faut que la prétension dans les aciers dépasse 4 t/cm², alors que dans les premiers essais de Kœnen elle était restée notablement inférieure. Mais nous verrons dans un instant que, s'ils sont déterminants en ce qui concerne *la doctrine du béton précontraint*, pendant longtemps ils n'ont pas trouvé d'application généralisée, parce qu'au point de vue pratique ils comportent une lacune, comblée depuis par les nouveaux brevets de 1941.

Il résulte donc de ce qui précède que le système de forces de précontrainte doit être calculé non seulement en fonction des charges auxquelles l'ouvrage sera soumis, mais également en fonction des *propriétés des matériaux utilisés*, plus particulièrement du béton.

Depuis que M. Freyssinet a attiré l'attention sur le phénomène du fluage, de nombreux essais ont été exécutés en divers pays. Ils ont permis de mettre en lumière le fait que la déformation du béton est en réalité composée de trois termes, le retrait du béton, le raccourcissement élastique réversible, et enfin le raccourcissement plastique ou fluage qui dépend de l'intensité des forces sollicitant le béton, et de la durée de leur application. Ces trois effets sont du même ordre de grandeur ; il importe donc de les connaître exactement tous trois. Il n'y a pas lieu d'insister sur les déformations élastiques, caractérisées par le module E admis couramment égal à 200 t/cm². La technique de la fabrication du béton a cependant évolué ces dernières années et l'on peut fabriquer aujourd'hui des bétons dont la résistance à la compression est de l'ordre de 400 à 500 kg/cm² et dont le module atteint 400 ou même 500 à 600 t/cm².

Il est plus difficile d'étudier séparément l'influence du retrait proprement dit et du fluage. Ces deux phénomènes se superposent en effet et sont influencés par des causes analogues.

Le fluage, en particulier, dépend entre autres de la compacité du béton, donc de sa teneur en eau, elle-même fonction du diamètre maximum et de la nature des grains de gravier. Il dépend également du mode de fabrication, béton coulé ou béton vibré ; il dépend encore de la durée d'application de la force.

On a pu constater, heureusement, qu'au bout de 3 à 4 ans, le fluage *cesse pratiquement d'augmenter*, c'est-à-dire que sa valeur atteint une limite. Mais, et ceci est capital, on a pu constater également que l'importance du fluage dépend dans *une très large mesure de l'âge du béton au moment où la force est appliquée*. On devine aisément que si le béton est mis en compression au bout d'une journée déjà, ce qui serait souhaitable du point de vue industriel et économique, son fluage est beaucoup plus accentué que si la sollicitation n'intervient qu'au bout de plusieurs semaines. Ce fait est capital du point de vue du prix de revient des procédés.

Parmi les très nombreux essais effectués dans différents laboratoires d'essai des matériaux, on doit citer plus spécialement ceux de Lausanne, publiés dernièrement par M. le professeur *Bolomey* dans le *Bulletin technique de la Suisse romande*[1], qui sont plus complets et plus systématiques que d'autres. Ces essais mettent précisément en évidence les influences qui viennent d'être rappelées et dont les effets fâcheux avaient été constatés dans les premières réalisations industrielles. En particulier, ils ont montré que l'âge du béton, au moment de la mise en charge modifie considérablement l'importance du fluage.

L'examen des graphiques (fig. 6, 7 et 8), établis d'après la publication du professeur Bolomey, conduit aux conclusions pratiques suivantes :

1. Pour diminuer le fluage, il ne faut pas précontraindre des bétons trop jeunes ; c'est ainsi que le fluage des bétons précontraints à 3 jours atteint 1,4 à 1,5 fois le fluage des bétons précontraints à 90 jours.

2. Les bétons vibrés, mis en place avec peu d'eau, ont un fluage beaucoup plus modéré que les bétons mous.

Il résulte de ce qui précède que le béton pour les ouvrages destinés à être mis en précontrainte doit être de haute qualité. Il n'est pas question d'utiliser des bétons coulés avec beaucoup d'eau ; il faut, au contraire, avoir recours à des bétons aussi secs que possible et convenablement vibrés. Une des propriétés fondamentales que l'on doit exiger du béton est un durcissement rapide, car l'économie des chantiers exige que l'appareillage de mise en tension soit libéré au plus tôt pour que son utilisation soit la plus complète. M. Freyssinet espérait obtenir par le chauffage à la vapeur du béton, un durcissement assez rapide pour permettre l'application des forces avant 24 heures. Cette tentative n'a pas été couronnée d'un plein succès. Les installations pour le chauffage du béton sont compliquées et rendent l'application du procédé impraticable dans de nombreux cas. Comme il s'agit d'en amortir le coût rapidement, on est conduit à comprimer le béton très jeune et à ne le laisser dans les moules que très peu de temps. Or, les graphiques des figures 6 à 8 montrent qu'une attente de 15 jours ou même davantage est indiquée.

En présence des difficultés résultant du fluage du béton trop jeune qui oblige à maintenir les aciers en tension pendant plusieurs jours, voire même plusieurs semaines, en les fixant soit sur des massifs d'ancrage, soit sur les moules, M. Freyssinet a eu l'idée de s'appuyer sur le béton durci. Les aciers sont groupés en câbles, entourés d'un guipage et laissés tels quels pendant toute la période d'attente nécessaire au durcissement ; ils sont mis en tension au moment où le béton a acquis suffisamment de résistance. Ces câbles sont distribués convenablement dans la section de béton pour créer les efforts artificiels désirés ; ils ne sont pas nécessairement rectilignes et peuvent être *légèrement courbes* pour mieux s'adapter aux variations d'efforts (fig. 9 *c* et 9 *d*). Au lieu de placer les câbles, protégés contre l'adhérence par une gaine de clinquant ou de papier dans

[1] *Bulletin technique* du 17 avril 1943.

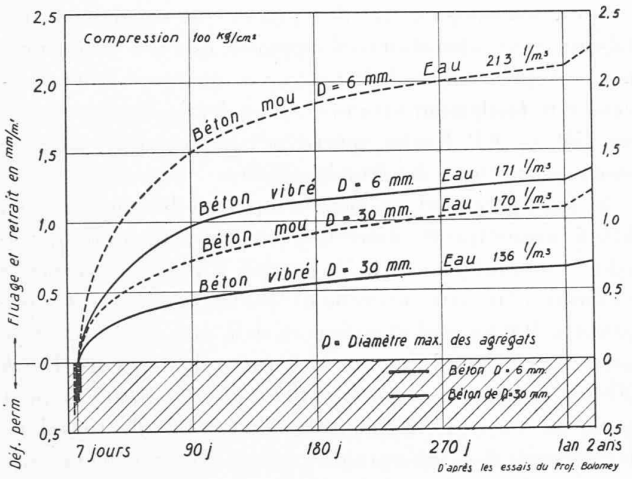

Fig. 6. — Fluage et retrait des bétons suivant la quantité d'eau de gâchage.

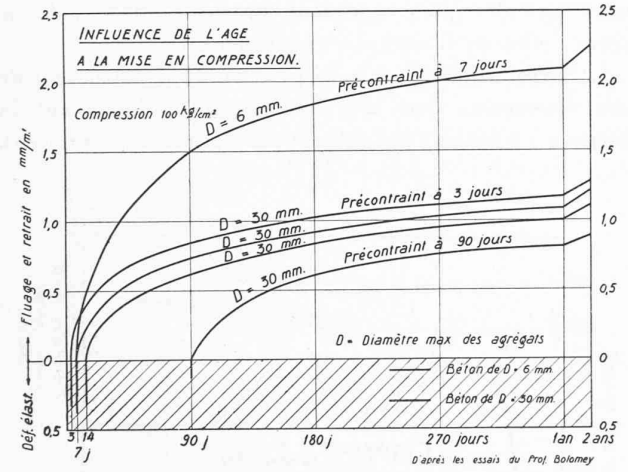

Fig. 7. — Fluage et retrait des bétons mous. Les quantités d'eau sont indiquées sur la figure 6.

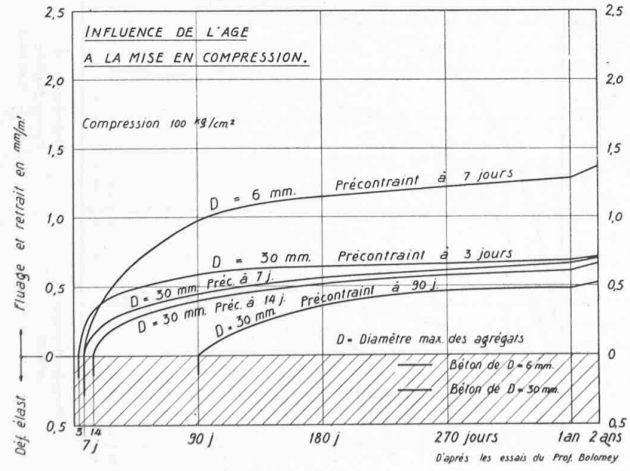

Fig. 8. — Fluage et retrait des bétons vibrés. Les quantités d'eau sont indiquées sur la figure 6.

le béton frais, on peut aussi, dans certains cas, ménager un logement dans le béton au moyen d'un mandrin et y introduire les câbles après coup. C'est ce procédé qui a été employé avec succès pour la fabrication des pylônes livrés aux Chemins de fer fédéraux pour l'électrification de la ligne Auvernier—Les Verrières. Dans l'un et l'autre des cas, les aciers peuvent être tendus au moment opportun au moyen de vérins spéciaux très ingénieux dont la figure 10 donne une photographie. L'ancrage se fait aux deux extrémités (ou à une seule) au moyen de cônes qui bloquent les fils. Il est possible de recourber les extrémités des fils et de les enrober dans un culot de béton exécuté après coup. C'est ce qui a été fait pour les pylônes livrés aux Chemins de fer fédéraux.

Ce nouveau procédé, qui a fait l'objet de brevets déposés en 1939, présente le très grand avantage de *séparer nettement les deux opérations de fabrication du béton et d'application de la précontrainte.* On peut ainsi attendre aussi longtemps qu'il convient sans immobiliser des dispositifs ou des coffrages coûteux. Une fois la mise en tension opérée, il est facile d'injecter du ciment dans les gaines et autour des câbles de manière à enrober les aciers. Ce procédé de blocage des fils par cônes aux extrémités des poutres présente, par rapport à la mise en tension par adhérence au béton, un autre avantage encore ; celui de faire agir la précontrainte non seulement dans la partie centrale de la poutre, mais également aux extrémités.

Enfin, l'ancrage par cônes permet ainsi d'éliminer le *raccourcissement élastique* du béton dû à la précon-

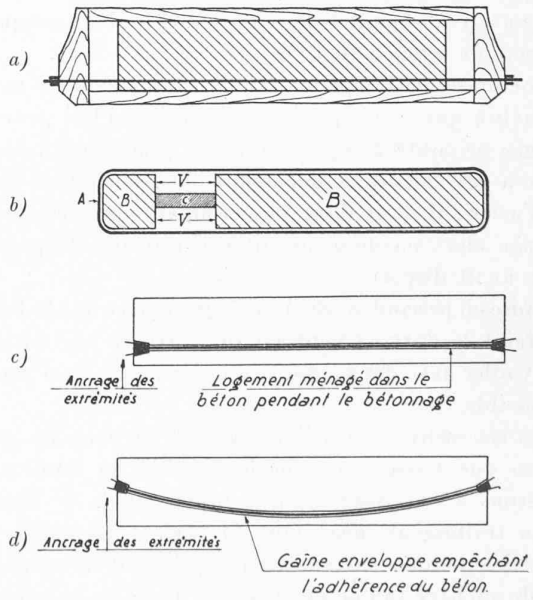

Fig. 9. — Les différents procédés de mise en précontrainte.

a) L'armature tendue s'appuie provisoirement sur le coffrage.

b) L'armature s'appuie sur le béton qui est exécuté en deux parties séparées par un joint de clavage.

c) et *d)* L'armature, placée dans une gaîne, est ancrée dans le béton à chacune de ses extrémités.

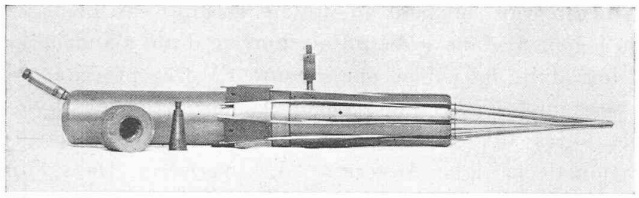

Fig. 10. — Vérin de mise en tension des câbles.

trainte, puisque le blocage des fils a lieu au dernier moment, quand le béton a subi le raccourcissement élastique de précontrainte. En résumé, par l'emploi d'armatures indépendantes du béton, ancrées par cônes, pour un même effort maximum dans les aciers, *on peut éliminer la perte de précontrainte due à la déformation élastique du béton et diminuer, dans une grande mesure, l'effet néfaste du retrait et du fluage des bétons comprimés trop jeunes.*

On ne peut pas arrêter à l'avance la valeur de la déformation plastique à faire intervenir dans les calculs ; car elle dépend de la grandeur de la précontrainte, de l'âge du béton au moment où les forces sont appliquées, de la quantité d'eau de gâchage, de la grosseur des agrégats maximum ; les graphiques des figures 6 à 8 montrent que cette déformation varie entre 0,5 et 2,25 mm/m que l'on peut considérer comme valeurs extrêmes ; dans chaque cas particulier, on devra choisir la valeur la plus convenable. Quoi qu'il en soit, d'après les valeurs extrêmes ci-dessus de la déformation plastique spécifique, et avec un module d'élasticité de l'acier de 2100 t/cm², la chute de tension dans les aciers due aux déformations plastiques est comprise entre 1,050 t/cm² et 4,800 t/cm².

Ces valeurs des chutes de tension à craindre expliquent les échecs de Kœnen en 1909 :

Le béton de cette époque était certainement de moindre qualité que celui qu'on utilise aujourd'hui pour les ouvrages précontraints ; en outre, la précontrainte était limitée à des valeurs ne dépassant pas beaucoup 1 t/cm² dans l'acier ; il n'est donc pas étonnant qu'après l'effet de fluage alors inconnu, on ait constaté que la précontrainte avait disparu.

La mise en précontrainte différée jusqu'à ce que le béton ait atteint le durcissement voulu, n'exclut pas l'intérêt de travailler avec des bétons à durcissement aussi rapide que possible.

Dans cet ordre d'idée, il y a lieu de signaler les perspectives que laisse entrevoir le procédé de fabrication des bétons à durcissement très rapide dû à M. *Walter*. Par un traitement mécanique, il permet de mettre en œuvre des bétons extrêmement secs dont la quantité d'eau de gâchage tombe jusqu'à près de 50 % de celle des bétons à consistance habituellement appelée « terre humide ». On obtient des bétons très compacts, dont la densité dépasse 2,5 t/m³ et dont la résistance est acquise au bout de quelques jours déjà.

Les figures 11 et 12 montrent les résultats obtenus jusqu'à maintenant sur des prismes et sur des poutres fabriqués en laboratoire. Il apparaît que des résistances à la compression de 600 kg/cm² à quelques jours peuvent être facilement atteintes, avec des dosages en ciment de 250 kg CP Roche spécial/m³. Ces résultats intéressants permettent de grands espoirs.

Si théoriquement on peut concevoir des ouvrages en béton précontraint, dans lesquels les contraintes préalables sont inférieures à 50 kg/cm², l'intérêt du procédé s'affirme plus particulièrement quand le béton est comprimé à 100 kg/cm² et même au delà ; on est en droit de prétendre aujourd'hui que des précontraintes de 150 à 200 kg/cm² dans le béton n'ont rien d'excessif, et l'on peut regretter que les essais de fluage du béton, effectués dans la plupart des laboratoires, aient fait intervenir des précontraintes trop faibles.

L'autre matériau utilisé dans le béton précontraint est l'acier. Il faut évidemment avoir recours à des aciers spéciaux à haute résistance et dont la limite d'élasticité élevée permet de les tendre à des contraintes suffisamment grandes pour que leur précontrainte résiduelle après l'effet du fluage soit encore efficace.

La métallurgie met à la disposition du constructeur de tels matériaux, dont les prix — du moins avant la guerre — n'étaient pas de beaucoup plus élevés que ceux

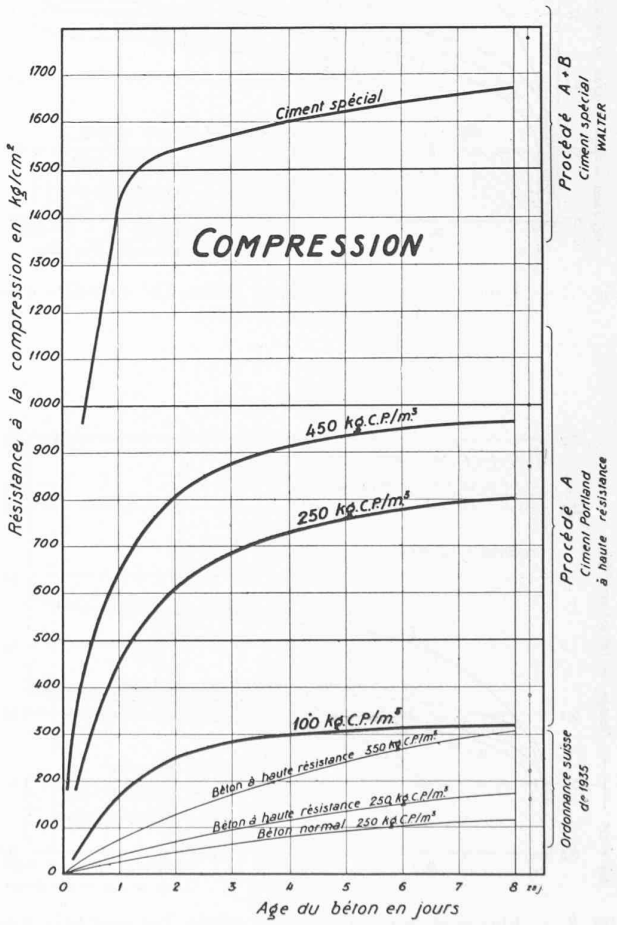

Fig. 11. — Bétons Walter. Résistance à la compression.

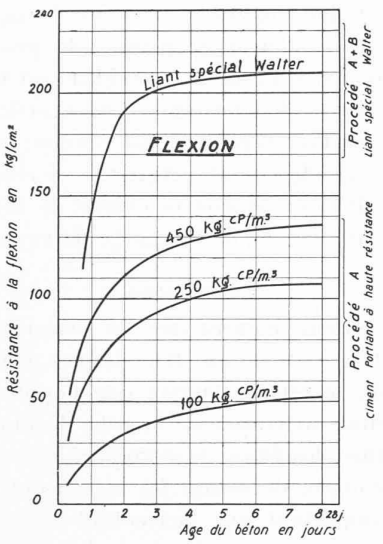

Fig. 12. — Bétons Walter. Résistance à la flexion.

des aciers courants ; le graphique (fig. 13) donne les caractéristiques résultant des diverses nuances d'acier que l'on peut trouver dans le commerce.

On pourrait craindre que les aciers spéciaux utilisés pour ces fils perdent leur résistance sous l'effet de charges alternées ou du froid. Sans vouloir prétendre que ce problème est définitivement éclairci aujourd'hui, il faut cependant noter que les aciers utilisés sont très semblables aux aciers des ressorts au sujet desquels on dispose d'une longue expérience. Mais enfin il n'en reste pas moins qu'il y a là un problème qui doit retenir l'attention de l'ingénieur et quoi qu'il en soit, il est indispensable de veiller à ce que, sous l'effet des surcharges, la variation de la tension des fils soit limitée au minimum. Or, le calcul montre que lorsque l'ouvrage précontraint est bien conditionné, l'application des surcharges n'apporte qu'une modification insignifiante des efforts dans les aciers. Ainsi, dans le cas d'un pont sous rails, destiné à la gare de Fribourg, constitué par une simple dalle de 11,00 m de portée et de 60 cm d'épaisseur moyenne, la tension initiale dans les aciers est de 8,5 t/cm² et se réduit sous l'effet du fluage à 7,06 t/cm².

L'application des surcharges porte cette tension à 7,25 t/cm². En service, les efforts oscillent donc entre 7,05 t/cm² et 7,25 t/cm², soit moins de 3 %. Il apparaît donc que dans une construction précontrainte, l'effort principal de l'acier est celui qui crée la précontrainte initiale ; l'effet des surcharges reste secondaire.

L'emploi d'aciers à très haute résistance présente une difficulté technique sérieuse, c'est celle des ancrages.

Dans ses premières réalisations, M. Freyssinet utilisait des aciers dont la limite d'élasticité était augmentée par étirage à froid. Il pouvait ainsi souder sur les fils des plaques ou des moignons facilitant l'ancrage des fils dans le béton. Avec les aciers spéciaux à très haute résistance obtenus par trempage, la soudure est exclue parce qu'elle annule l'effet de la trempe dans le voisinage de

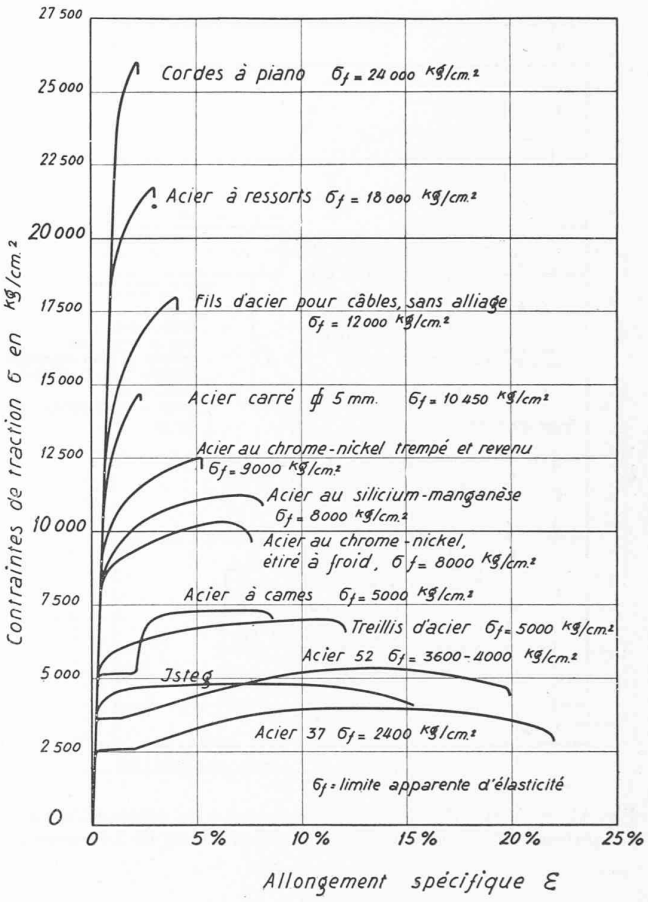

Fig. 13. — Caractéristiques des aciers.

la région soudée. On peut évidemment recourir à des ancrages par coins d'acier bloqués *sur le fil*, mais ces dispositifs paraissent trop coûteux pour pouvoir se généraliser.

Les brevets primitifs de M. Freyssinet envisagent également l'ancrage automatique du fil dans le béton par simple adhérence et gonflement du fil lorsque sa tension se relâche. C'est le système préconisé par M. Hoyer. Ce procédé étant souvent mis en question, on doit préciser que dans les brevets Freyssinet français et suisse de 1929, l'utilisation de fils de faible diamètre, *sans ancrage aucun*, est expressément prévue.

Nous avons fait, à titre privé, de nombreux essais de poutres avec fils lisses avec et sans ancrage. Ces essais datent de 1938 et 1939 et sont donc antérieurs à ceux qui ont été exécutés à Schinznach par la Commission suisse instituée pour l'étude du béton précontraint. La couverture de la terrasse du Laboratoire d'hydraulique est d'ailleurs portée par de telles poutrelles précontraintes exécutées sur 100 m de longueur, dont la section est représentée sur la figure 14.

Les essais de Hoyer semblent avoir montré qu'un glissement ultérieur des fils n'est pas à craindre. Nous sommes en droit d'être moins catégoriques : on a dû rebuter certaines poutrelles dont les fils avaient légèrement glissé. Dans tous les cas, il est indispensable de

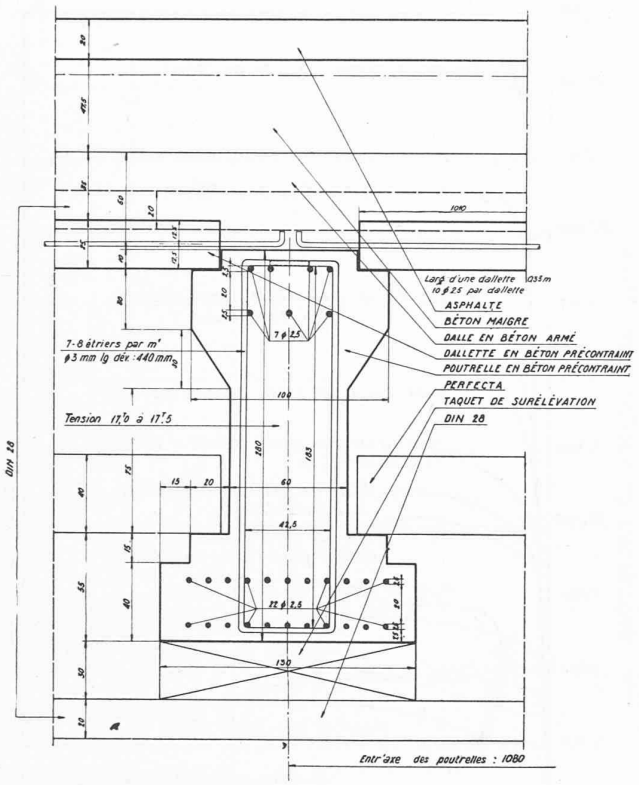

Fig. 14. — Poutrelles en béton précontraint du plafond du Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne.

débarrasser complètement le fil d'acier de la fine couche grasse qui le recouvre lorsqu'il arrive de l'usine. Il semble indiqué aujourd'hui de limiter l'emploi de fils sans ancrage à des ouvrages de peu d'importance. On ne saurait prendre la responsabilité d'un grand ouvrage exécuté exclusivement avec des fils lisses sans ancrage.

Les difficultés que nous venons d'esquisser en quelques mots nous ont beaucoup préoccupé depuis plusieurs années que nous poursuivons l'étude du béton précontraint, et nous estimons qu'actuellement le seul procédé pratiquement réalisable pour des poutres longues et qui offre une sécurité absolue est celui du blocage par cônes. Ces cônes peuvent être en métal ou même en béton. Pour de petits ouvrages (traverses de chemin de fer par exemple), on peut exercer les efforts en écartant les deux moitiés de la poutre et en remplissant l'intervalle par un mortier spécialement résistant.

Il me reste encore un mot à dire de la sécurité des ouvrages en béton précontraint. On doit rappeler tout d'abord que la précontrainte *n'augmente pas la charge de rupture des poutres. La précontrainte permet d'utiliser les aciers à haute résistance tout en augmentant considérablement la charge pour laquelle les fissures du béton apparaissent.* On peut donc disposer les aciers de manière que la charge de fissuration soit très voisine de la charge de rupture. Il suffit pour cela de prévoir une précontrainte suffisamment élevée. Une telle mesure est tout à l'avantage de la bonne tenue de l'ouvrage, mais elle présente cependant un danger : la fissuration du béton est un avertissement que l'ouvrage a été surchargé. Elle rend donc attentif au danger et permet de prendre toutes mesures utiles. Si la limite de fissuration est trop rapprochée de la limite de résistance, cet avertissement n'a plus d'effet et l'ouvrage peut se rompre brusquement sans qu'aucun indice n'ait permis de se rendre compte du danger : Il faudrait que la charge de fissuration ne dépasse pas 70 à 80 % de la charge de rupture.

Conclusions.

Ce court exposé montre que les principes du béton précontraint sont en somme très simples, mais il permet également de se rendre compte que l'application exige une très grande attention de la part de l'ingénieur qui doit déterminer les forces à introduire dans le système, en tenant compte de toutes les circonstances. Il n'est pas moins important que l'exécutant travaille avec le plus grand soin pour que les hypothèses de l'ingénieur soient véritablement réalisées. On conçoit facilement qu'une exécution, qui ne serait pas minutieuse, risquerait de compromettre le succès de toute l'entreprise.

SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

Rapport de gestion pour l'année 1942.[1]

(Suite et fin).[1]

Mesures d'économie de guerre.

Le Comité central a traité dans le courant de l'année différentes mesures d'économie de guerre de nature interne ou générale, particulièrement avec l'Office de guerre pour l'industrie et le travail.

A la fin d'avril 1942, le Comité central a étudié la question de l'organisation de la construction avec la Société suisse des entrepreneurs, et sur la base de ces délibérations, en mai, il a envoyé au chef du Département fédéral de l'Economie publique des propositions précises pour cette organisation. Les associations se sont prononcées pour une centralisation des mesures touchant la construction et pour la création d'une seule instance de coordination pour la répartition des matériaux de construction, tandis que le contrôle de leur fabrication devait incomber à la Section des matériaux de construction. Dans la suite, le Bureau des constructions a été créé au sein de l'Office de guerre pour l'industrie et le travail, qui a appelé M. de Sinner, architecte, à la tête de cet organisme. L'office de contrôle de la S. I. A. pour les fers de construction qui, sous la direction de M. R. Eichenberger, ingénieur, a rendu les meilleurs services depuis sa fondation, a été rattaché au Bureau de constructions, tout en restant organiquement subordonné à la S. I. A. Le chef de l'Office de contrôle, M. R. Eichenberger, ingénieur, a été désigné en même temps comme suppléant du chef du Bureau des constructions.

Après l'acier, le ciment a été le deuxième matériau rationné. La question du ciment a vivement préoccupé le Comité central, surtout quand on projeta la fabrication d'un ciment amaigri « B ». Le Comité central a réuni alors un certain nombre de personnalités compétentes pour élucider la question ; l'assemblée prit position à l'unanimité contre ce projet,

[1] Voir *Bulletin technique* du 12 juin et 26 juin 1943, p. 146 et 156.