

# Note sur l'intérêt économique et certaines limites d'application de la précontrainte partielle

Autor(en): **Baus, R. / Brenneisen, A. / Claude, G.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **8 (1968)**

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-8835>

## **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.

DISCUSSION PRÉPARÉE / VORBEREITETE DISKUSSION / PREPARED DISCUSSION

**Note sur l'intérêt économique et certaines limites d'application de la précontrainte partielle**

Bemerkungen zur Wirtschaftlichkeit und zu bestimmten Anwendungsgrenzen der teilweisen Vorspannung

Some Limit-Applications of Partial Prestressing and Their Economic Interest

R. BAUS  
Professeur

A. BRENNEISEN  
Assistant

G. CLAUDE  
Assistant

Université de Liège, Belgique

INTRODUCTION.

Le développement de la précontrainte partielle, aux côtés du béton armé et de la précontrainte intégrale, trouve sa justification dans l'intérêt économique que présente cette technique lorsque les conditions de sollicitations des ouvrages conduisent, soit à une limitation de l'excentricité de l'effort de précontrainte, soit à une augmentation de cet effort en vue d'empêcher l'apparition de contraintes de traction dans les fibres extrêmes des pièces.

Ainsi, par exemple, dans le cas des pièces sollicitées par des moments de flexion de signes contraires, l'excentricité de l'effort de précontrainte est automatiquement réduite; les charges permanentes interviennent dès lors dans le dimensionnement et l'utilisation d'une armature passive s'avère intéressante, au point de vue économique. Il en est de même dans le cas des pièces soumises à des surcharges exceptionnelles importantes qui conduisent à un surcroît de précontrainte toujours coûteux; la dépense correspondante peut être réduite par l'utilisation d'une armature passive permettant l'exploitation, sous les surcharges exceptionnelles, de la zone tendue de la section.

La première partie de la présente étude a pour but de définir, sur des bases théoriques, les domaines d'application économique de la précontrainte partielle.

Par ailleurs, le développement de cette technique est considérablement freiné par l'incertitude que nous avons de la sécurité de fonctionnement des ouvrages partiellement précontraints; l'influence défavorable que peuvent

présenter certains facteurs limite sévèrement les domaines d'application de la précontrainte partielle.

Dans la deuxième partie de l'étude, nous examinons, sur la base de résultats expérimentaux, l'influence des principaux facteurs relatifs à l'apparition et à l'évolution de la fissuration ainsi qu'au risque de rupture en fatigue des armatures et des éléments partiellement précontraints.

#### I. LES DOMAINES D'APPLICATION ECONOMIQUE DE LA PRECONTRAINTE PARTIELLE.

On ne peut affirmer a priori, et en toute généralité, qu'une poutre vérifiée en classe II est plus économique qu'une poutre vérifiée en classe I. En effet, pour une même surcharge, la section de béton nécessaire, l'effort de précontrainte et la hauteur minimale d'une poutre partiellement précontrainte peuvent être, suivant la portée et la forme de la section, inférieurs ou supérieurs à ceux d'une poutre intégralement précontrainte. En fait, deux facteurs agissent en sens inverses.

En admettant des contraintes de traction dans le béton, tout en conservant les mêmes contraintes de compression, on augmente les capacités portantes des sections en service, tandis que, pour un même moment sollicitant, les sections où l'on admet des tractions peuvent être moins importantes que celles vérifiées en classe I.

Par ailleurs, le moment sollicitant intervenant dans le dimensionnement d'une section n'est pas toujours le même pour les vérifications en classe I et en classe II, car la portée critique diminue lorsque la valeur des contraintes de traction admises dans le béton augmente; la partie des charges permanentes influençant le dimensionnement d'une section est en fait plus grande en précontrainte partielle, dès que la portée dépasse la valeur critique.

En-deçà de la portée critique des poutres partiellement précontraintes, on peut obtenir des réductions des sections de béton, par rapport aux poutres précontraintes; au-delà de cette limite, les sections des poutres partiellement précontraintes augmentent, avec la portée, plus rapidement que les sections des poutres précontraintes, et peuvent ainsi devenir plus grandes.

Les efforts de précontrainte et les hauteurs minimales des poutres, sont en relation directe avec les sections de béton, et varient ainsi dans le même sens avec la portée des poutres.

En considérant comme variables caractéristiques les sections d'acier, les sections de béton et les hauteurs minimales, on constate qu'il existe, pour chacune de ces variables prises séparément, des portées limites en-deçà desquelles la précontrainte partielle conduit à une solution plus favorable que la

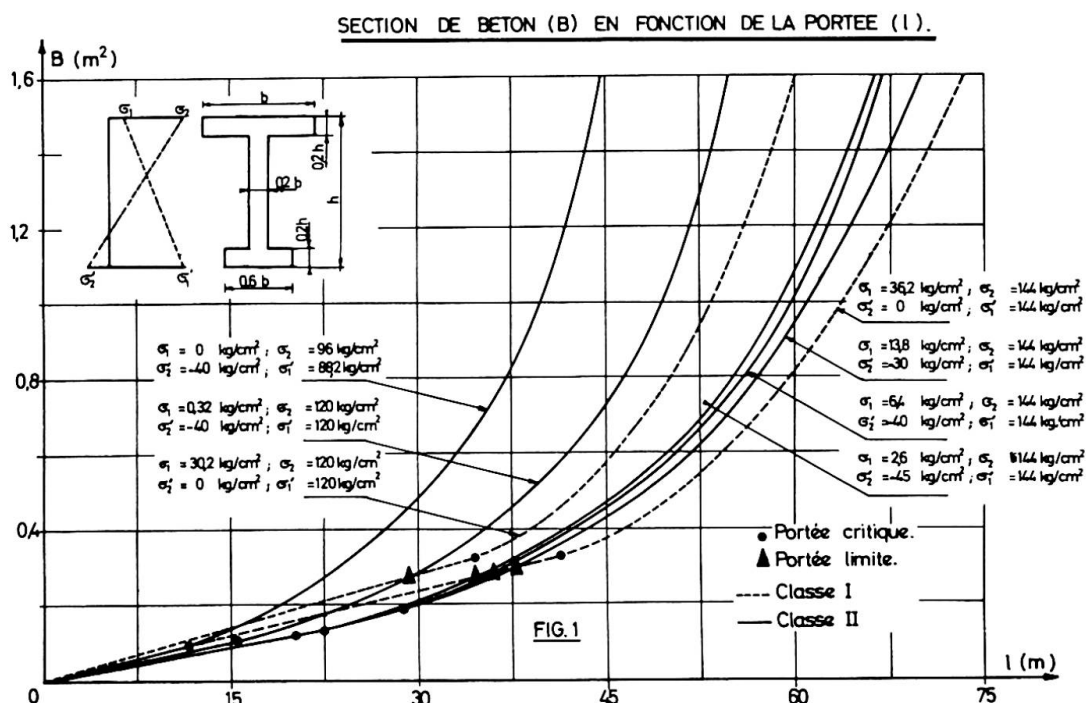
précontrainte intégrale.

Afin de préciser ces portées limites, on a établi, à la fois pour des poutres précontraintes et partiellement précontraintes, les courbes donnant l'évolution de la section de béton, de l'effort de précontrainte et de la hauteur minimale, en fonction de la portée; les points de croisement de ces courbes déterminent les portées limites.

L'aire nécessaire B de la section de béton d'une poutre précontrainte ou partiellement précontrainte peut être exprimée par une fonction hyperbolique de la portée, composée de deux tronçons distincts pour les portées inférieures ou supérieures à la portée critique.

Ces fonctions dépendent de la forme géométrique de la section, des conditions d'appuis, des surcharges et des contraintes admissibles. Elles ont été établies pour différentes formes de sections de poutres isostatiques et pour différentes valeurs des contraintes admissibles.

Nous ne considérerons, à titre d'exemple, que les courbes établies pour un type de poutre en double té dissymétrique et une charge uniformément répartie de 1 T/m.



La figure 1 montre l'évolution de l'aire B en fonction de la portée. Les courbes en traits interrompus sont relatives aux poutres précontraintes tandis que les courbes en traits pleins correspondent aux poutres partiellement précontraintes.

Les portées critiques et les portées limites figurent sur ces courbes; les portées limites correspondent aux points de croisement des courbes en traits pleins et en traits interrompus établies pour les mêmes contraintes de compression du béton.

On constate :

1. que les portées critiques des poutres partiellement précontraintes sont nettement plus faibles que celles des poutres précontraintes,
2. que les limites de portées intéressantes sont plus petites que les portées critiques en classe I. Les portées limites augmentent avec les tensions de compression admises et diminuent lorsque les tensions de traction augmentent.

Par exemple, pour la section représentée à la figure 1, on voit que la portée limite est de 29 m. lorsque les contraintes de compression sont égales à  $120 \text{ kg/cm}^2$  et la contrainte de traction égale à  $40 \text{ kg/cm}^2$ ; cette limite passe à 36 m. si la contrainte de compression est de  $144 \text{ kg/cm}^2$ . Par conséquent, une augmentation de la qualité du béton permet d'augmenter les portées limites.

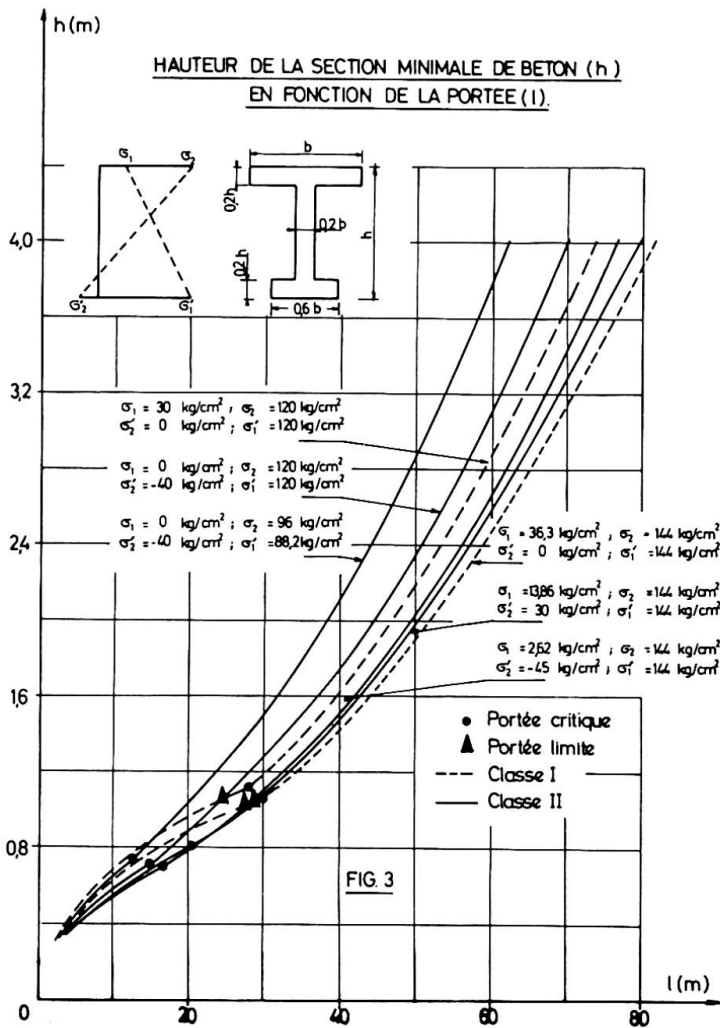
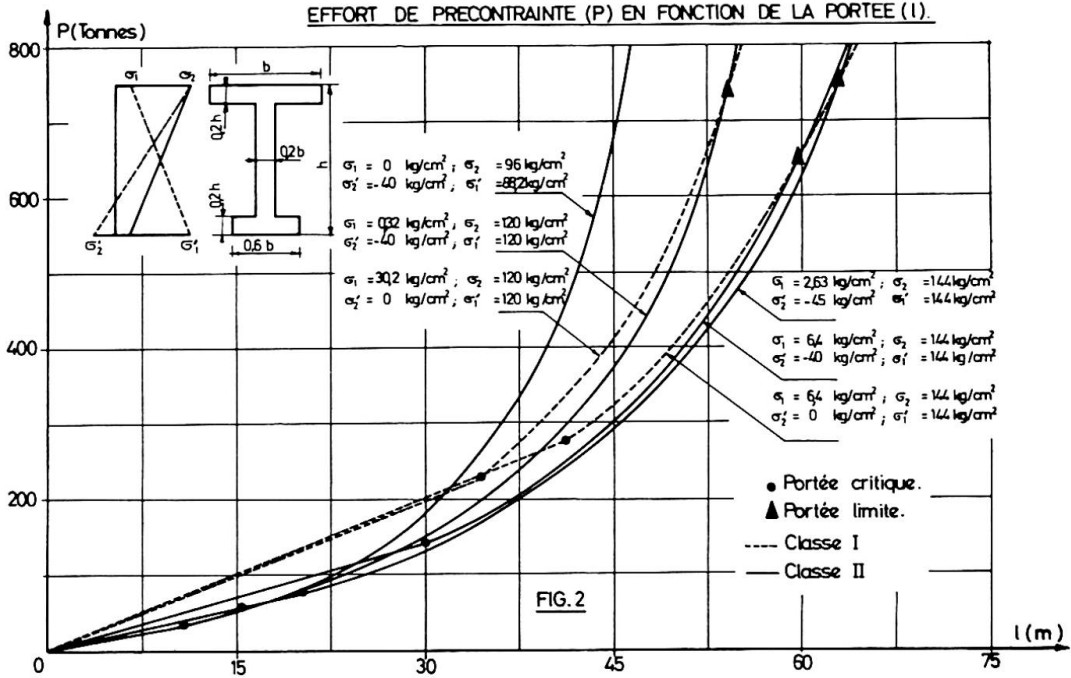
On remarque également que les portées limites diminuent légèrement si les tensions de traction augmentent.

En faisant varier la forme de la section, on peut trouver, pour chaque portée, une forme de section conduisant à une aire  $B$  minimale, on constate ainsi que pour les faibles portées, la section en double té symétrique donne la solution optimale; si la portée augmente, la section optimale devient dissymétrique, la largeur du talon tendant progressivement vers zéro.

Il est possible de déterminer, pour des contraintes extrêmes données, aussi bien pour le béton intégralement précontraint que pour le béton partiellement précontraint, des courbes enveloppes des sections optimales en fonction de la portée.

La figure 2 donne l'évolution de l'effort de précontrainte  $P$  en fonction de la portée, pour une section en double té dissymétrique. Ces courbes ne diffèrent des précédentes que par une constante égale à la contrainte moyenne de compression, définie en fonction des contraintes extrêmes et de l'aire de la section.

On constate que, contrairement aux courbes de la figure 1, les courbes de l'effort de précontrainte correspondant respectivement aux classes I et II se croisent loin au-delà des portées critiques du béton précontraint. Les portées limites relatives à l'effort de précontrainte sont donc plus élevées que celles relatives à l'aire des sections; ces portées augmentent également avec la qualité du béton.



La figure 3 donne l'évolution, en fonction de la portée, de la hauteur minimale des poutres partiellement précontraintes et des poutres intégralement précontraintes, pour la même section en double té dissymétrique.

On constate que les hauteurs peuvent être plus faibles pour les poutres partiellement précontraintes que pour les poutres précontraintes mais les réductions possibles sont peu importantes.

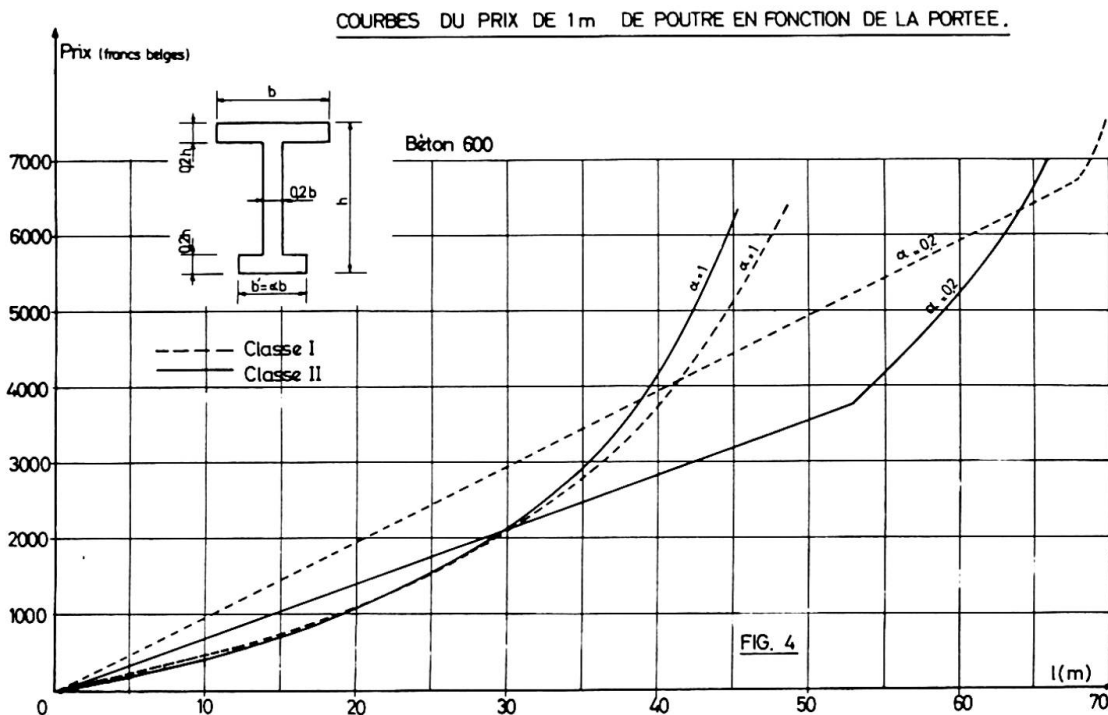
Des comparaisons analogues à celles qui précèdent ont été établies pour des poutres vérifiées respectivement en classe II et en classe III; dans ces comparaisons, on a également établi les courbes d'évolution des sections d'armatures passives, en fonction de la portée.

Ces comparaisons montrent que :

- les portées critiques des poutres sont toujours plus faibles en classe III qu'en classe II;
- l'effort de précontrainte nécessaire en classe III est toujours plus faible qu'en classe I; par contre, cet effort peut devenir plus important qu'en classe II, pour les faibles portées;
- que les sections nécessaires d'armatures passives sont évidemment plus importantes en classe III qu'en classe II.

Le tracé des courbes donnant l'évolution des section de béton  $B$ , des efforts de précontrainte  $P$  et des sections d'armatures passives  $A_p$ , en fonction de la portée, a été effectué pour 9 profils de poutres en double té dont les caractéristiques sont reprises à la figure 4; pour tous les profils, la hauteur totale  $h$  est égale à  $1/25^e$  de la portée, tandis que la largeur du talon  $b'$  varie entre la largeur de la table  $b$  et 20 % de cette largeur ( $\alpha = 1; 0,9 \dots 0,2$ ).

Sur la base des courbes relatives à  $B$ ,  $P$  et  $A_p$ , et des prix moyens pratiqués actuellement en Belgique pour les divers matériaux, on a établi, pour les



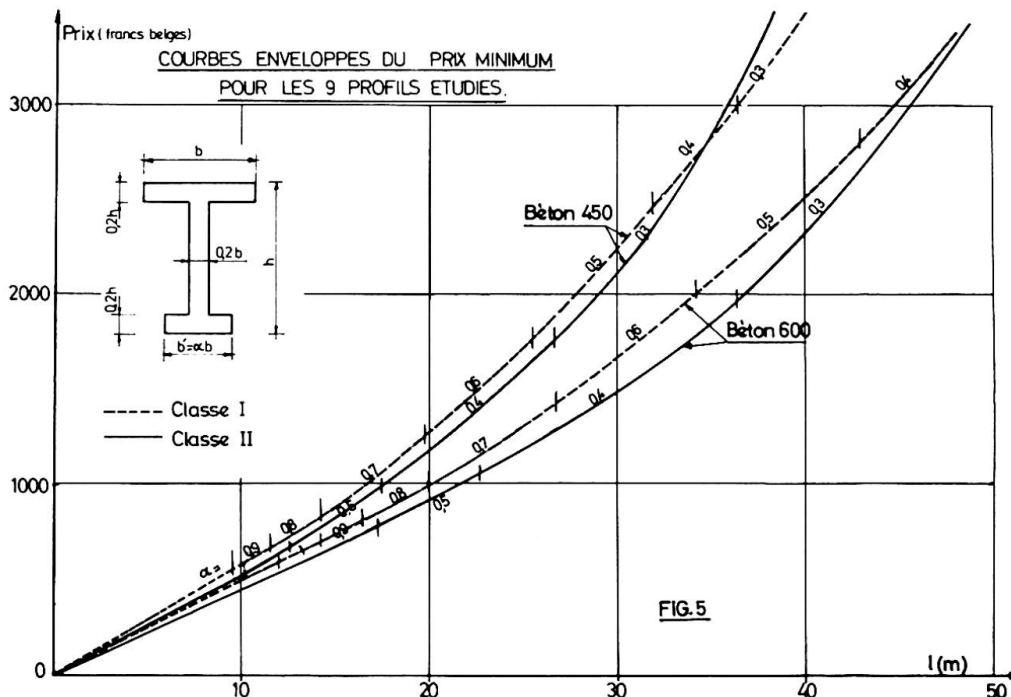
9 profils étudiés, les courbes donnant l'évolution en fonction de la portée, du prix par mètre courant de poutre, respectivement en classe I et en classe II, pour deux qualités de béton (B. 450 et B. 600).

Les courbes données à titre d'exemple à la figure 4 sont relatives aux deux profils extrêmes considérés ( $\alpha = 1$  et  $\alpha = 0,2$ ) et au béton B. 600.

On peut en tirer les conclusions suivantes :

- il existe, pour chaque profil, une limite de portée économique définie par le point de croisement des courbes de prix relatives aux classes I et II de vérification ; cette portée est à la fois une limite supérieure du domaine d'application économique de la précontrainte partielle en classe II et une limite inférieure du domaine d'application économique de la précontrainte en classe I ;
- à chacun des profils étudiés, il correspond une limite de portée économique passant de 30 m., pour les profils en double té symétrique ( $\alpha = 1$ ) à 63 m. pour les profils en té sans talon ( $\alpha = 0,2$ );
- la position relative des différentes courbes montre que, pour les portées inférieures à environ 30 m., il est plus économique d'utiliser un profil en double té symétrique en classe I ou II plutôt qu'un profil sans talon en classe II.

La figure 5 donne, pour les deux qualités de béton retenues, les courbes enveloppes du prix minimum, en fonction de la portée, pour l'ensemble des profils étudiés.





On constate d'après ces courbes que la classe II permet de réaliser une économie sensible en-deçà d'une portée limite de 63 mètres dans le cas du béton B. 600 et de 35 mètres dans le cas du béton B. 450.

Remarquons également qu'il est toujours plus économique d'utiliser, aussi bien en classe II qu'en classe I, un béton de haute résistance.

Les valeurs numériques reprises dans les conclusions dépendent des rapports de prix unitaire des matériaux utilisés et peuvent ainsi varier d'un pays à l'autre.

## II. INFLUENCE DE CERTAINS FACTEURS LIMITANT LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA PRÉCONTRAINTE PARTIELLE.

De nombreuses recherches expérimentales ont été entreprises à l'Université de Liège dans le but d'étudier le comportement des poutres partiellement précontraintes et de définir avec plus de précision les conditions d'application de la précontrainte partielle. Les principales conclusions, résumées dans ce qui suit, sont basées sur l'interprétation des résultats d'essais de 80 poutres précontraintes et partiellement précontraintes, ainsi que sur les résultats de plus de 500 essais de fatigue, effectués sur différents types d'armatures, dans les conditions de sollicitation des trois classes de béton précontraint.

### 1. Comportement d'ensemble sous charges statiques.

Sous charges statiques de courte durée, le comportement, au point de vue fissuration, déformation et rupture, d'une poutre partiellement précontrainte AP peut être déduit, avec une bonne approximation, du comportement de deux poutres de mêmes dimensions, comportant respectivement la seule armature passive (poutre A) et la seule armature de précontrainte (poutre P) de la poutre AP.

Les essais montrent en effet que l'on peut écrire les quatre relations suivantes, pour autant que les pourcentages d'armatures restent modérés :

$$M_R^{AP} = M_R^A + M_R^P \quad (1) \quad M_W^{AP} = M_W^A + M_d^P \quad (3)$$

$$M_f^{AP} = M_f^A + M_d^P \quad (2) \quad M_y^{AP} = M_y^A + M_d^P \quad (4)$$

Ces quatre relations s'énoncent successivement comme suit :

- (1) Le moment de rupture de la poutre AP est approximativement égal à la somme des moments de rupture de la poutre A et de la poutre P .
- (2) Le moment de fissuration de la poutre AP est approximativement égal à la somme du moment de fissuration de la poutre A et du moment de décompression de la poutre P .

- (3) Le moment correspondant à l'obtention d'une ouverture maximale des fissures ( $w$ ) de la poutre AP est, approximativement et en général avec sécurité, égal à la somme du moment qui provoque la même ouverture des fissures dans la poutre A et du moment de décompression de la poutre précontrainte.

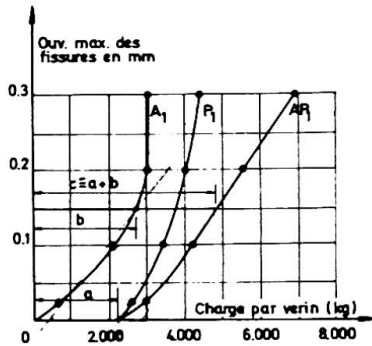


FIG. 6

La figure 6 donne, à titre d'exemple, l'évolution comparée de l'ouverture maximale des fissures en fonction de la charge appliquée, pour une poutre AP et pour les poutres A et P correspondantes.

- (4) Le moment correspondant à l'obtention d'une flèche déterminée de la poutre AP est approximativement égal à la somme du moment correspondant à l'obtention de la même flèche de la poutre A et du moment de décompression de la poutre P.

On constate ainsi qu'il est possible, dans le cas des poutres partiellement précontraintes, de bénéficier de leur comportement en tant que poutre précontrainte jusqu'à la décompression et de leur comportement en tant que poutre armée, au-delà de la décompression.

## 2. Comportement ultime sous charges statiques.

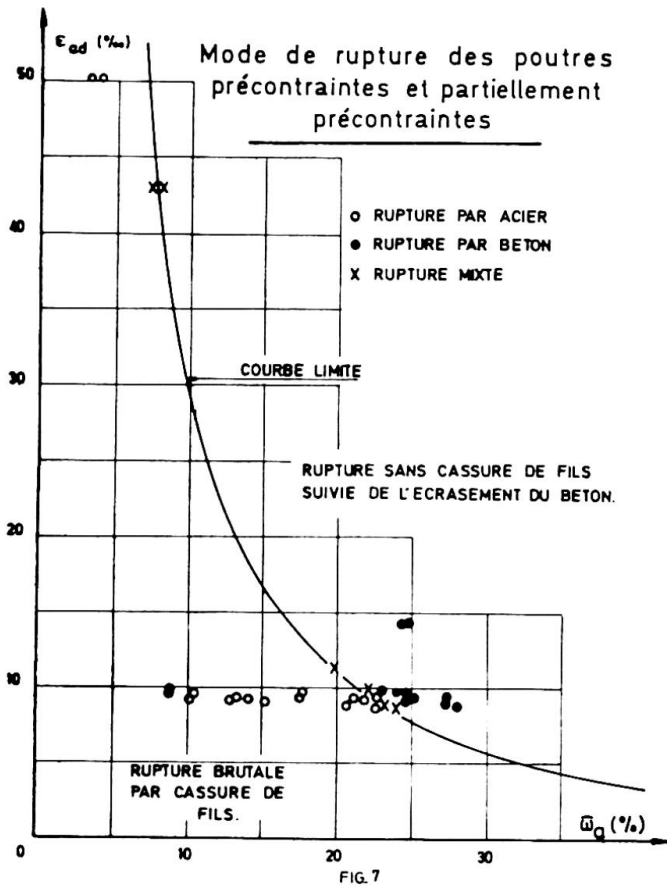
La rupture des poutres précontraintes et partiellement précontraintes peut se produire par cassure nette des armatures, par écrasement du béton ou simultanément par écrasement du béton et cassure des armatures (rupture mixte). Le mode de rupture dépend du degré de précontrainte, de la position relative des armatures active et passive et des caractéristiques du béton et des aciers.

Des études théoriques, confirmées par les recherches expérimentales, ont permis de déterminer une relation entre l'allongement disponible après mise en tension de l'armature active ( $\epsilon_{ad}$ ) et le pourcentage mécanique de cette armature ( $\bar{\omega}_a$ ) correspondant à l'obtention d'une rupture mixte.

Le diagramme de la figure 7 résume les résultats obtenus sur une série de 38 poutres précontraintes et partiellement précontraintes. Les points représentatifs des ruptures mixtes se distribuent avec une bonne précision sur une courbe dont l'équation est la suivante :

$$\epsilon_{ad} = \frac{376}{\bar{\omega}_a} - 7,5 \quad , \quad \text{avec} \quad \bar{\omega}_a = \omega_a \cdot \frac{R_{mG}}{\sigma'_{bm}}$$

( $\epsilon_{ad}$  et  $\omega_a$  en %).



Cette courbe permet d'obtenir des indications pratiques relatives au choix des types d'armatures et de bétons permettant d'éliminer le risque de rupture brutale par cassure nette des fils. Ainsi, pour un pourcentage géométrique d'armature  $\bar{\omega}_a$  et pour un acier de résistance  $R_{mG}$ , dont la capacité d'allongement disponible après mise en tension vaut  $\varepsilon_{ad}$ , on peut déterminer, à l'aide de cette courbe, la valeur minimale de  $\bar{\omega}_a$  et par conséquent la valeur à la fois maximale et optimale du béton ( $\sigma'_{bm}$ ) correspondant à l'obtention d'une rupture mixte. Inversement,

pour un béton de résistance donnée et pour une valeur déterminée de  $\bar{\omega}_a$ , la même courbe permet de définir la valeur minimale de  $\varepsilon_{ad}$  que doit présenter l'armature de précontrainte, pour éviter tout risque de rupture brutale par cassure nette des armatures; connaissant l'allongement  $\varepsilon_0$  absorbé lors de la mise en précontrainte, on peut en déduire la valeur minimale  $\varepsilon_0 + \varepsilon_{ad}$  de la capacité de déformation en charge que doivent présenter les armatures.

### 3. Comportement en fissuration.

La résistance à la fissuration des poutres sous charge statique de courte durée est proportionnelle à la résistance du béton et à l'effort de précontrainte. Les armatures de béton armé jouent un rôle favorable sur la fissuration apparaissant au cours de la première mise en charge, surtout si elles sont à adhérence améliorée; ces armatures conduisent en effet à la formation d'un grand nombre de fissures faiblement ouvertes. Par contre, au cours du déchargement, les armatures de béton armé empêchent partiellement les fissures de se refermer sous l'effet de la précontrainte. Les essais montrent qu'en leur absence, les fissures sont pratiquement refermées, pour des charges à peine inférieures aux charges de décompression, alors qu'en présence de ces armatures, il faut parfois descendre jusqu'à la moitié de la charge de décompression avant que des fissures,

dont l'ouverture avait atteint 0,1 mm., ne soient pratiquement refermées. Cet effet néfaste de l'adhérence des armatures est d'autant plus important que l'ouverture des fissures atteinte au cours de la première mise en charge a été plus importante. On a en effet observé dans certains cas que des fissures ayant atteint des ouvertures de 0,15 à 0,20 mm. ne se sont jamais plus refermées, même après déchargement complet.

La présence d'une fissuration permanente au déchargement et l'évolution de cette fissuration au cours de mises en charges successives entraînent une limitation non négligeable des domaines d'application pratique de la précontrainte partielle.

#### 4. Comportement sous charges dynamiques.

De nombreux essais de fatigue sur poutres partiellement précontraintes ont montré que leur comportement reste satisfaisant aussi longtemps que les charges ne dépassent pas la charge de décompression statique. Au-delà de cette charge, l'influence de la fatigue se traduit par une diminution de la charge de fissuration, qu'on peut estimer en moyenne à 20 % de la charge de fissuration statique, et par un accroissement rapide de l'ouverture des fissures, suivi ou non d'une stabilisation. Dans certains cas, des ouvertures permanentes non négligeables apparaissent après déchargement, dès que la charge de décompression a été dépassée en sollicitations dynamiques; dans tous les cas, les moments de réouverture des fissures sont fortement diminués. Des essais récents effectués à l'Université de Liège et au Laboratoire Magnel, dans le cadre d'une recherche subventionnée par le Centre Scientifique et Technique de la Construction et par l'IRSIA, montrent que, dans les conditions normales de service, l'état de fissuration des poutres soumises à des sollicitations dynamiques, tend vers une stabilisation, aussi bien sous charges maximales qu'après déchargement, et que les ouvertures résiduelles des fissures dépendent directement du pourcentage d'armature passive.

A titre d'exemple, la figure 8 montre l'évolution de l'ouverture maximum des fissures et de la flèche d'une poutre partiellement précontrainte soumise à des sollicitations dynamiques.

En ce qui concerne la résistance ultime des poutres partiellement précontraintes, on constate que celle-ci n'est pas affectée par la fatigue, pour autant que les armatures utilisées présentent des limites d'endurance adaptées aux sollicitations qui leur sont imposées.

Les limites d'endurance obtenues sur poutres sont en accord satisfaisant avec les limites d'endurance des armatures de précontrainte, sauf dans les cas

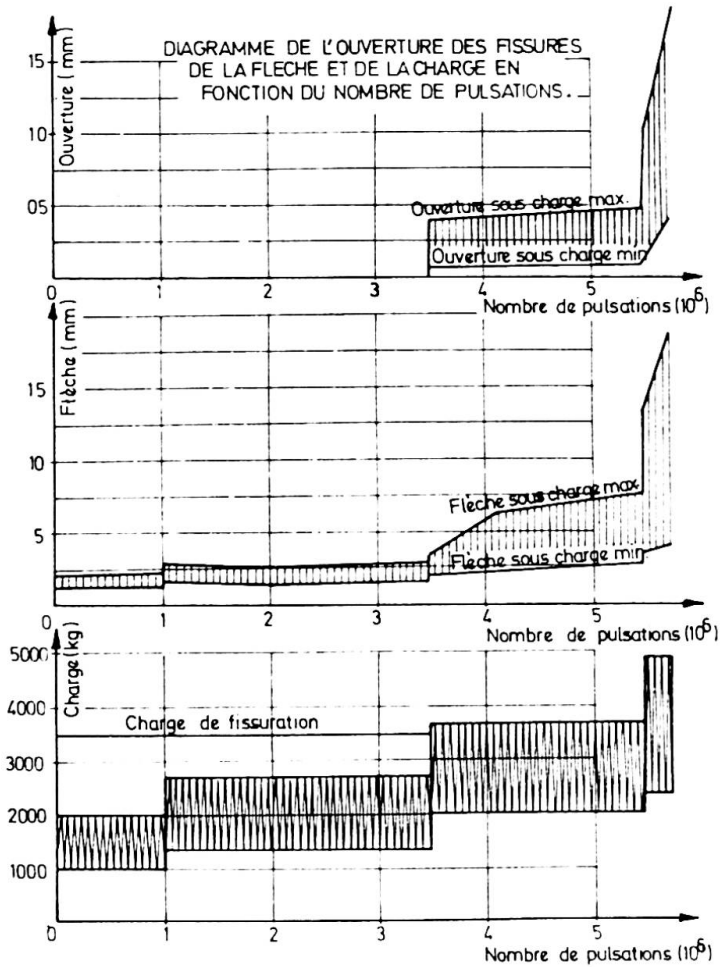


FIG. 8



Fig. 9.

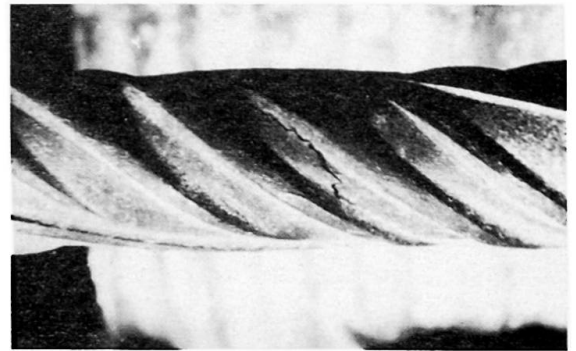


Fig. 10.

très fréquents où les armatures passives se rompent prématurément en fatigue sous l'effet des sollicitations alternées auxquelles elles sont soumises.

Les figures 9 et 10 montrent clairement la rupture par fatigue des armatures passives d'une poutre partiellement précontrainte.

Les résultats des recherches expérimentales font apparaître la nécessité de prendre en compte, dans le dimensionnement des poutres partiellement précontraintes, tous les facteurs influençant le comportement des pièces.

Les facteurs plus importants, qui ont trait au comportement sous charges dynamiques ou répétées, sont les suivants :

- au point de vue du comportement ultime et de la sécurité : les qualités d'endurance des aciers utilisés comme armatures passives et actives ainsi que les capacités d'allongement des armatures actives;
- au point de vue du comportement en service : l'importance, après stabilisation, de l'ouverture permanente des fissures et des ouvertures sous charges maximales.

## RÉSUMÉ

Le développement de la précontrainte partielle trouve sa justification dans l'intérêt économique que présente cette technique.

On peut définir sur des bases théoriques, les domaines d'application économique de la précontrainte partielle, c'est-à-dire des limites de portée économique.

Par ailleurs, l'influence défavorable que peuvent présenter certains facteurs sur le comportement des poutres partiellement précontraintes doit être prise en compte dans le dimensionnement.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung des teilweise vorgespannten Betons beruht auf dem wirtschaftlichen Interesse dieser Technik. Aus theoretischen Grundlagen kann man das wirtschaftliche Anwendungsgebiet des teilweise vorgespannten Betons festlegen, d.h. die Grenzen der wirtschaftlichen Spannweiten.

Beim Dimensionieren muss man jedoch die ungünstige Wirkung, die verschiedene Faktoren auf das Verhalten von teilweise vorgespannten Balken haben, berücksichtigen.

## SUMMARY

The development of partial prestressing is due to the economical interest which this technique presents. On theoretical bases, one may define the field of economical application of partial prestressing, in other words the limits of the economical spans.

On the other hand, as to designing, one has to consider the unfavourable influence which certain factors may have upon the behaviour of partially prestressed beams.

Leere Seite  
Blank page  
Page vide