

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 112 (1986)
Heft: 7

Artikel: Béton précontraint
Autor: Picard, André
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-75978>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

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

Béton précontraint

par André Picard, Québec (Canada)

Le professeur André Picard, qui enseigne au Département de génie civil de l'Université de Laval, est l'auteur d'un ouvrage sur le béton précontraint¹, consacré à la théorie et aux méthodes de calcul des ouvrages. L'approche de ces problèmes étant quelque peu différente de celle que nous connaissons chez nous, il nous a paru intéressant de présenter ce livre plus en détail dans un article rédigé par l'auteur.

Rédaction

1. Introduction

L'ouvrage présenté ici traite du calcul aux états limites des pièces en béton précontraint. Il contient les développements théoriques conduisant aux équations utilisées pour les calculs. Les résultats de nombreux travaux de recherche expérimentale sur les pièces en béton précontraint ont été colligés et confrontés aux prédictions théoriques. Les équations obtenues théoriquement ont parfois été modifiées pour tenir compte des résultats expérimentaux ou des considérations pratiques. Des exemples numériques détaillés illustrent l'utilisation des équations proposées.

Le texte de l'ouvrage est divisé en deux tomes contenant chacun cinq chapitres. Dans le premier tome, il est surtout question de dimensionnement des pièces en béton précontraint. Les équations proposées permettent de définir les dimensions de la section transversale de la pièce, le tracé du câble moyen et l'aire de la section des armatures de précontrainte. Il s'agit ensuite d'affiner la solution préliminaire en analysant le comportement de la charpente et des pièces. Le deuxième tome traite de l'analyse du comportement des pièces, ce qui ne signifie pas que le dimensionnement soit terminé. Il faut en effet déterminer les armatures passives nécessaires pour compléter l'action de la précontrainte et assurer une sécurité suffisante vis-à-vis les états limites ultimes.

2. Principe fondamentaux de la précontrainte

Dans le premier chapitre sont définis les modes de précontrainte, les classes de précontrainte, les principes fondamentaux du calcul aux états limites et les trois principes généraux de la précontrainte. Selon la classification proposée, la précontrainte est totale ou partielle. La précontrainte totale n'est utilisée qu'excep-

tionnellement et la plupart des pièces sont en précontrainte partielle. Le béton armé précontraint est un cas particulier de précontrainte partielle. Une pièce est en béton armé précontraint lorsque la fissuration est considérée comme faisant partie du fonctionnement normal de la pièce sous une charge supérieure à la charge permanente. La question du béton armé précontraint est largement traitée dans le deuxième tome, en tenant compte entre autres de l'expérience suisse (travaux du professeur H. Bachmann, EPFZ).

Concernant le calcul aux états limites, la particularité de cette méthode de calcul est le fait que la sécurité, associée aux états limites ultimes, est évaluée en tenant compte de la variabilité statique des sollicitations et de la résistance, et qu'à un indice de sécurité donné, il est possible d'associer une probabilité de rupture. Un exemple illustre comment le concept de probabilité de rupture a remplacé le concept de coefficient de sécurité.

Dans le premier chapitre, on explique que la méthode de dimensionnement proposée pour les pièces précontraintes est basée sur les états limites d'utilisation. Les états limites de formation de

fissures et de compression excessive du béton permettent de définir les contraintes admissibles en traction et en compression lors de la mise en précontrainte du béton et sous les charges d'utilisation. En considérant ces états limites, il est possible de développer des équations pour déterminer le tracé du câble moyen et l'intervalle des valeurs à l'intérieur duquel doit se situer l'intensité de la force de précontrainte. L'analyse consiste à vérifier tous les autres états limites d'utilisation ou ultimes: état limite de déformations (cambrure et flèches), états limites de résistance ultime à la flexion, à l'effort tranchant et à la torsion... (contenu du deuxième tome).

La dernière partie du premier chapitre contient des explications détaillées sur les trois principes généraux qui constituent les fondements de la théorie du béton précontraint dans le domaine élastique: principe du matériau homogène et élastique, principe du couple de résistance interne et principe des charges équivalentes. Des exemples illustrent que, du point de vue calculs, ces trois principes sont équivalents. Cependant, dépendant du type de calculs, il y a généralement un principe qui est plus efficace que les autres. Ainsi, on utilise généralement le principe du matériau homogène et élastique pour le calcul des contraintes, le principe du couple de résistance interne pour déterminer le fuseau de passage et le principe des charges équivalentes pour le calcul des déformations.

3. Caractéristiques du béton et de l'acier précontraints

Le béton précontraint exige une très bonne connaissance du comportement de ses principaux constituants, l'acier à haute résistance et le béton. Ces deux matériaux travaillent à des taux élevés, particulièrement lors de la mise en pré-

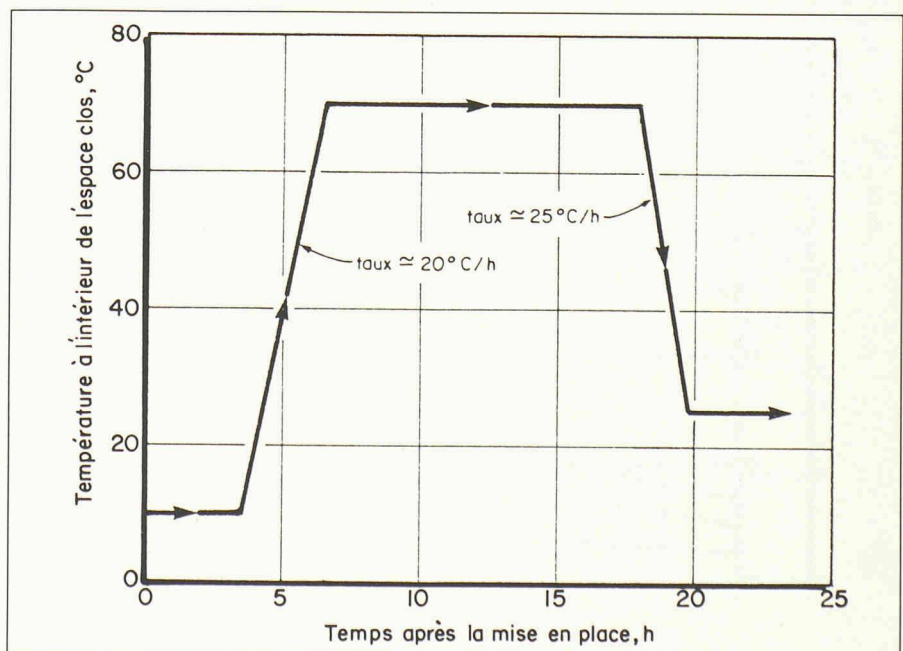


Fig. 1. — Cycle d'un traitement thermique pour cure accélérée du béton.

¹ *Béton précontraint*, par André Picard, en deux tomes 18 x 25 cm (Principes fondamentaux et dimensionnement, 355 pages — Analyse, 538 pages). Editions Gaëtan Morin, Québec, 1983-1985. Distribué en Europe par les Editions Eska S. à r. l., rue de Domrémy 30, F-75013 Paris.

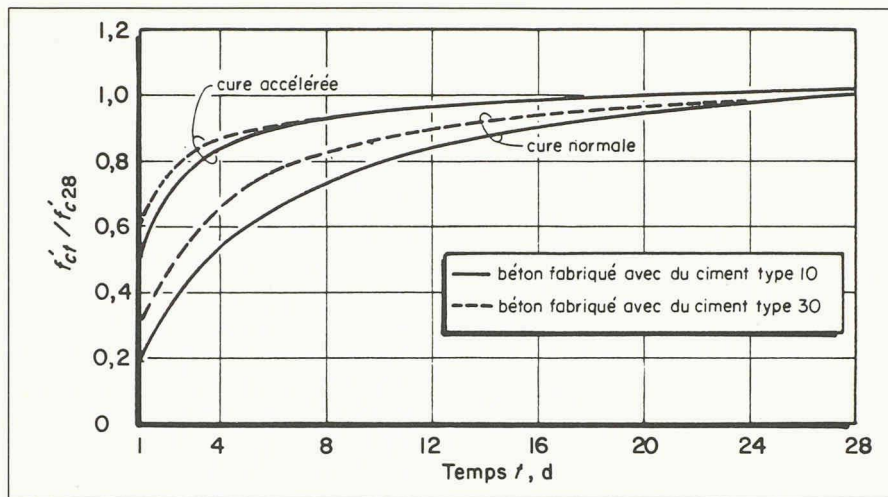


Fig. 2. — Résistance du béton en fonction du temps.

contrainte du béton, et doivent donc être de très bonne qualité. De plus, étant donné que la précontrainte est une sollicitation permanente de grande intensité, il est essentiel de considérer non seulement les propriétés les plus fondamentales des matériaux mais aussi certains phénomènes dont les effets ne sont pas instantanés mais apparaissent avec le temps. Le deuxième chapitre est surtout consacré à l'étude des propriétés physiques et mécaniques du béton et de l'acier de précontrainte, en insistant particulièrement sur les phénomènes différés: le retrait et le fluage du béton et la relaxation de l'acier. Les figures 1 à 3 sont tirées de ce chapitre.

Tel qu'indiqué dans le chapitre 2, le retrait pur, c'est-à-dire totalement libre et dans un environnement constant, le fluage pur, c'est-à-dire sous compression constante et dans un environnement constant, et la relaxation pure, c'est-à-dire sous allongement constant et à température constante, ne se retrouvent pas dans les pièces précontraintes. Ainsi, le fluage du béton se produit sous compression décroissante car le retrait du béton et la relaxation de l'acier causent une diminution de la contrainte de traction dans l'acier et, par conséquent, une diminution du taux de compression du béton. Réciproquement, le fluage et le retrait produisent un raccourcissement du

béton qui cause une diminution de l'allongement de l'acier, de sorte que la relaxation de l'acier se produit sous une longueur décroissante. Il existe donc une interaction assez complexe des trois phénomènes, ce qui signifie que toute variation de contrainte ou de déformation de l'un ou des deux matériaux se répercute sur l'autre et crée de nouvelles conditions d'évolution du système. Il est par conséquent nécessaire d'introduire des termes correctifs dans les équations décrivant les phénomènes purs. Il faut également diviser le temps en intervalles à moins de tenir compte indirectement de l'interaction des trois phénomènes, tel que proposé dans plusieurs normes.

4. Les pertes de tension

Le troisième chapitre contient une étude détaillée et systématique des pertes de tension. Des phénomènes inévitables tendent à réduire l'intensité de l'effort de traction dans l'acier de précontrainte. Ils sont attribuables au procédé de mise en tension des aciers, au mode de précontrainte et au comportement des matériaux. L'étude des pertes de tension est présentée selon l'ordre dans lequel ces pertes se produisent: pertes de tension lors de la mise en tension de l'acier et au moment de l'ancrage; pertes de tension lors de la mise en précontrainte du béton dues au raccourcissement élastique instantané du béton; pertes de tension différées dues à la relaxation de l'acier, au retrait et au fluage du béton.

Dans le chapitre 2, les trois phénomènes différés ont été étudiés séparément. Dans le chapitre 3, on tient compte de l'interaction des trois phénomènes en divisant le temps en intervalles et en calculant successivement les pertes de tension différées dans chaque intervalle, en commençant par le premier au début duquel les pertes de tension différées sont nulles. Cette division du temps en intervalles s'avère nécessaire surtout lorsque la charge permanente varie en cours d'exécution. L'augmentation de la charge permanente fait varier le taux de compression du béton et par conséquent modifie les conditions de fluage.

5. Poutres isostatiques et hyperstatiques

Les deux chapitres suivants traitent du dimensionnement des poutres isostatiques et hyperstatiques. La première partie du chapitre 4 est consacrée à des considérations d'ordre pratique. Il est entre autres question de l'influence des particularités du site sur le choix d'une solution pour la réalisation de l'ouvrage, du type de sections transversales utilisé pour les poutres de pont compte tenu de la portée des travées, et des modes de construction des ponts. Quelques règles de bonne pratique peuvent être établies en exploitant les renseignements tirés des réalisa-

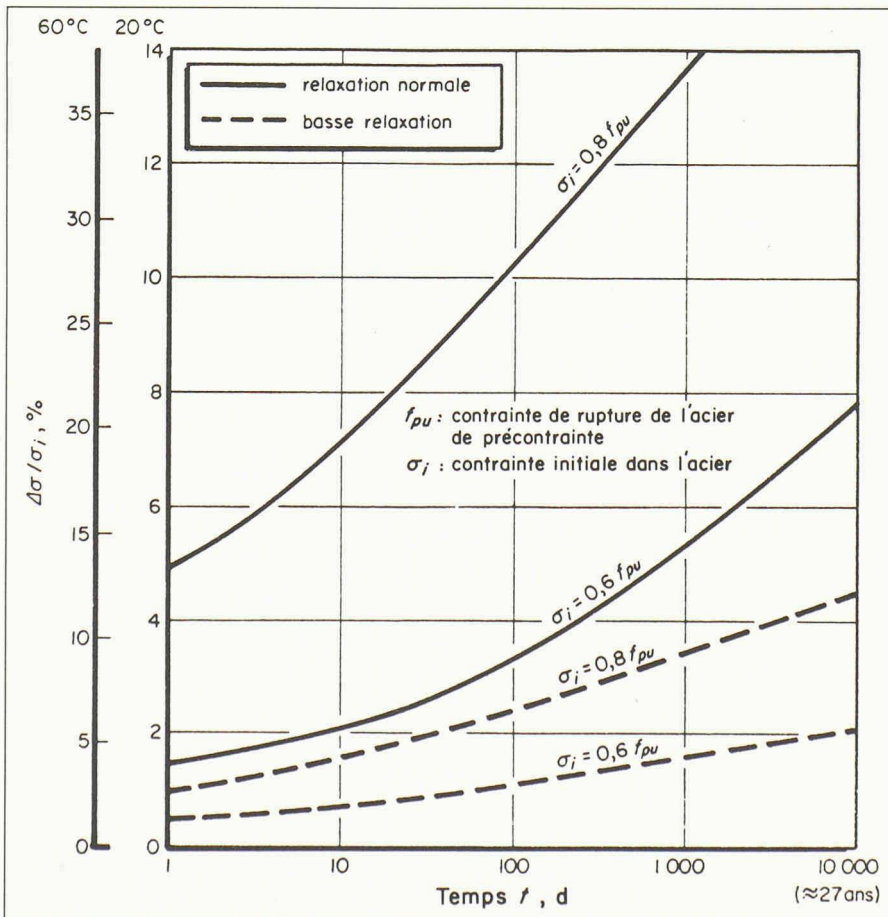


Fig. 3. — Pertes de contrainte par relaxation d'un toron de précontrainte.

tions antérieures. Ces règles permettent de définir la gamme des valeurs que peuvent prendre certains paramètres du dimensionnement.

Les développements théoriques du chapitre 4 permettent de déterminer deux limites supérieures et deux limites inférieures à la force de précontrainte. Les conditions à satisfaire lors de la mise en précontrainte du béton fournissent les limites supérieures. En respectant la plus petite de ces limites, on est assuré de ne pas avoir trop de précontrainte. Les conditions à satisfaire en service fournissent les limites inférieures. En respectant la plus grande de ces limites, on est assuré d'avoir assez de précontrainte en service. Les équations développées dans ce chapitre permettent aussi de calculer le noyau limite et le fuseau de passage à partir duquel on définit le tracé du câble moyen. La question du dimensionnement des poutres à section composite est également traitée dans le chapitre 4. Les figures 4 et 5 sont tirées de ce chapitre. Pour les poutres hyperstatiques, il faut utiliser dans les calculs l'excentricité effective de la force de précontrainte au lieu de l'excentricité réelle. Cette particularité des poutres hyperstatiques est étudiée dans le chapitre 5. On y présente deux méthodes de calcul de l'excentricité effective : la méthode interne basée sur la théorie du travail virtuel et la méthode directe basée sur le principe des charges équivalentes.

Ensuite, on explique les modifications qu'il faut apporter à certaines équations du chapitre 4 qui ne sont valides que pour les poutres isostatiques. On démontre que les équations de calcul du fuseau de passage restent inchangées sauf que, dans le cas d'une poutre hyperstatique, c'est l'excentricité effective du câble moyen qui doit se situer à l'intérieur du fuseau de passage alors que, pour une poutre isostatique, c'est l'excentricité réelle. Il est également question dans le chapitre 5 des effets du retrait différentiel et du fluage gêné dans les poutres composites, et de la redistribution des efforts par fluage.

6. Flexion, effort tranchant et torsion

Les chapitres 6 et 7 sont consacrés à l'étude de la résistance ultime à la flexion, à l'effort tranchant et à la torsion. Pour réaliser le dimensionnement des pièces, on a considéré les contraintes normales produites dans le béton sous les deux chargements les plus critiques en service normal, soit à la mise en précontrainte du béton et sous la charge d'utilisation maximale. Toutefois, le fait de satisfaire les contraintes admissibles sous ces deux chargements critiques ne garantit pas une sécurité suffisante vis-à-vis de la rupture. Il est donc essentiel de vérifier les états limites ultimes.

Dans le chapitre 6, on présente deux

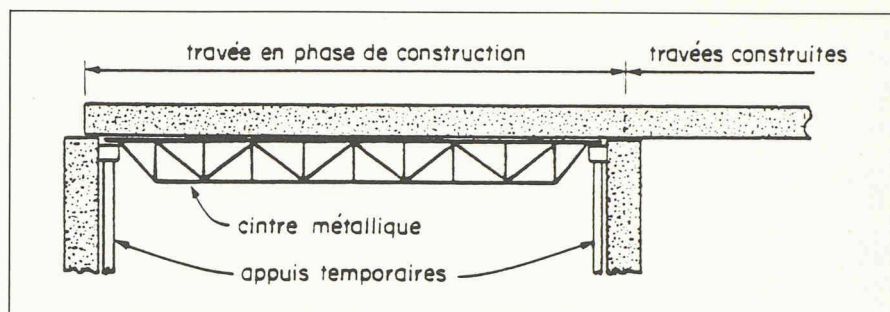


Fig. 4. — Construction travée par travée sur cintre autoporteur.

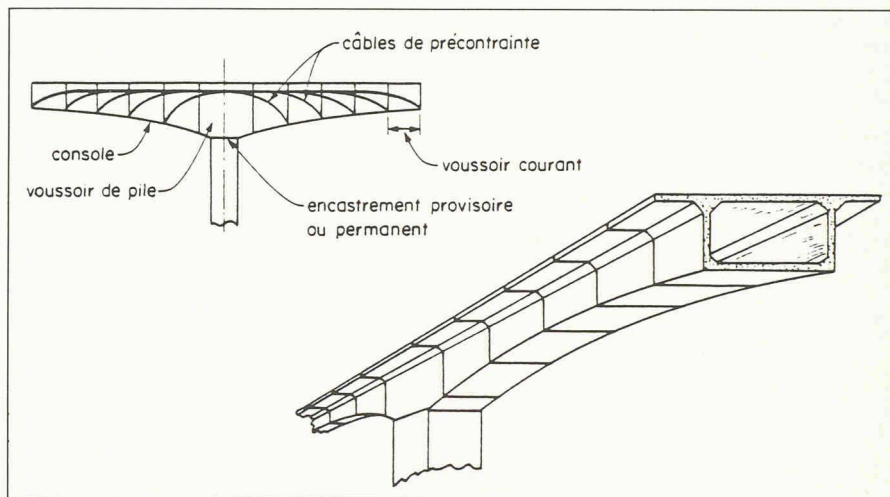


Fig. 5. — Principe général de la construction par encorbellement.

méthodes de calcul de la résistance ultime en flexion. La première est une méthode approximative basée sur des hypothèses simplificatrices, qui se situent du côté de la sécurité selon les résultats de la recherche expérimentale. Cette méthode permet de déterminer les armatures passives longitudinales qui, à certaines sections le long de la pièce, sont nécessaires pour compléter l'action de la précontrainte.

La deuxième méthode de calcul est itérative et elle est utilisée pour la vérification des sections. Il s'agit de la méthode de compatibilité qui permet d'optimiser la quantité d'armature longitudinale et de tracer la courbe de comportement théorique d'une poutre. Cette courbe représente la relation qui existe entre le moment fléchissant sollicitant la section critique et la flèche ou la rotation de la pièce à cette section (fig. 6).

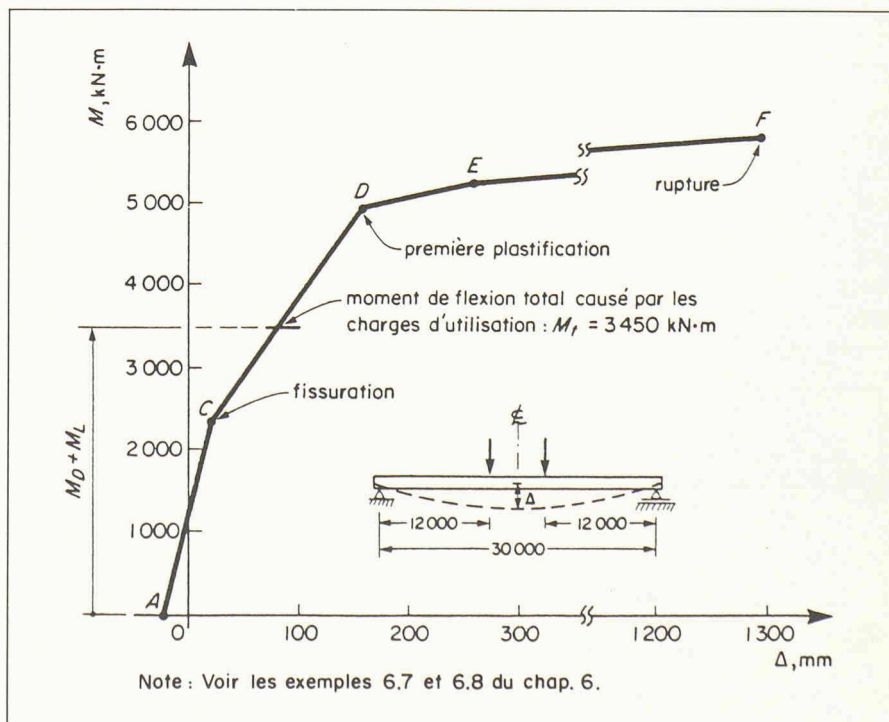


Fig. 6. — Courbe M - calculée.

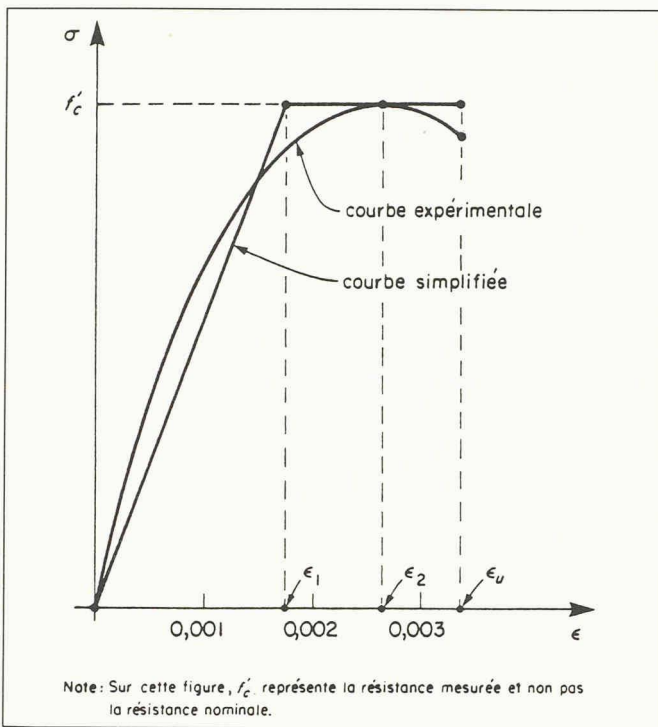


Fig. 7. — Courbes contrainte-déformation du béton.

En plus des deux méthodes de calcul décrites précédemment, on présente une nouvelle théorie de l'indice d'armature basée sur la ductilité. Les valeurs maximales de l'indice d'armature qui sont proposées permettent d'éviter une rupture fragile due à une trop grande quantité d'armature longitudinale dans la zone en traction de la pièce. La question du béton armé précontraint est également traitée dans le chapitre 6. Les figures 6 à 8 sont tirées de ce chapitre.

Le cisaillement dû à l'effort tranchant et à la torsion fait l'objet du chapitre 7 qui contient une étude des contraintes en phase élastique et une étude de l'état limite ultime.

L'étude des contraintes en phase élastique permet de déterminer l'influence qu'exercent la précontrainte longitudinale et la précontrainte transversale sur l'intensité et la direction des contraintes principales de traction et de compression. Elle permet aussi de définir une contrainte de cisaillement admissible qui assure l'intégrité du béton de l'âme sous les charges d'utilisation. Il est alors possible de retenir l'hypothèse du comportement élastique en service.

Pour le calcul des armatures transversales, on considère l'état limite ultime. L'étude de cet état limite repose sur le modèle du treillis (fig. 9 à 11), à partir duquel on élabore deux méthodes de calcul des armatures transversales: une méthode simplifiée et une méthode basée sur la théorie du champ de compression. Le chapitre 7 contient également une étude sur la résistance au poinçonnement des dalles précontraintes.

7. Flèches et zones d'ancrage

Le chapitre 8 est consacré à l'étude des déformations des pièces fléchies précontraintes sous l'action des charges d'utilisation. Une section importante de ce chapitre traite du béton armé précontraint. A cause de la précontrainte, une pièce en béton précontraint conserve son intégrité et son élasticité sous les charges d'utilisation. Le calcul des flèches ne devrait donc poser aucune difficulté puisque toute la section de béton est efficace pour réagir aux déformations. De plus, les équations de la théorie élastique sont

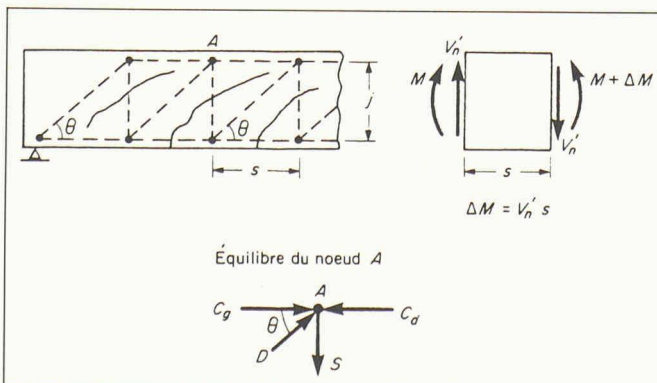


Fig. 9. — Modèle du treillis: armature transversale verticale.

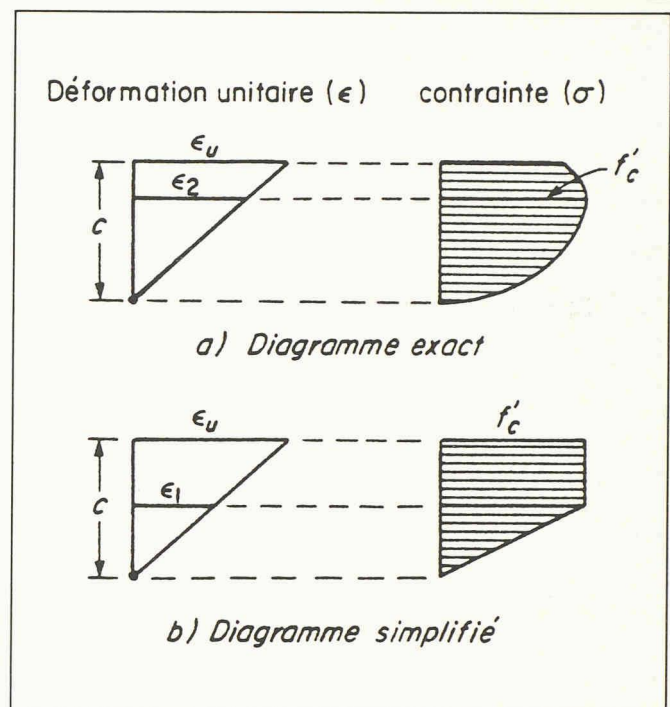


Fig. 8. — Diagrammes des contraintes correspondant aux courbes de la figure 7.

valides. Toutefois, à cause du fluage du béton, il faut tenir compte de la durée d'application des charges. La flèche due à une action de longue durée, telle que la précontrainte ou une charge permanente, comprend deux composantes: la flèche élastique instantanée et la flèche différée.

Pour le calcul des flèches élastiques instantanées, qu'il s'agisse de celles dues aux actions permanentes ou aux actions transitoires, on utilise les équations classiques de la résistance des matériaux. Pour le calcul des flèches différées, on présente deux méthodes de calcul: la méthode des coefficients de fluage et la méthode du fluage différentiel. La première méthode est plus simple et elle est suffisante pour obtenir un ordre de grandeur de la flèche différée. La deuxième méthode est plus raffinée et exige plus de calculs. Elle tient compte du gradient des contraintes normales à travers la section. Il s'agit de calculer le gradient de contraintes à plusieurs sections et de déterminer la courbure due au fluage différentiel causé par ce gradient de contraintes. Ensuite, il s'agit d'intégrer les courbures pour obtenir les déformations.

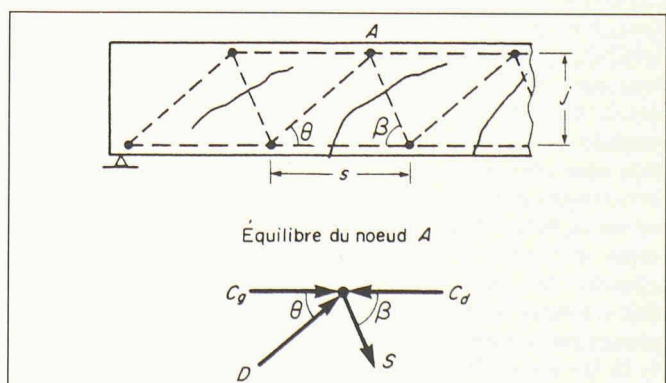


Fig. 10. — Modèle du treillis: armature transversale inclinée.

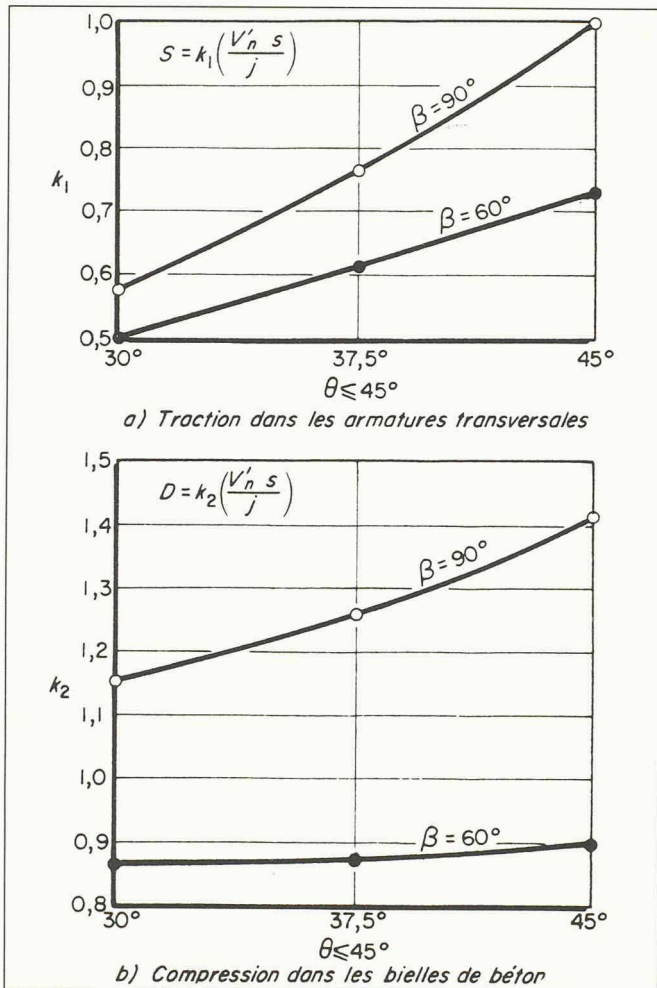


Fig. 11. — Influence de l'inclinaison des fissures (θ) et de l'inclinaison des armatures transversales (β) selon le modèle des treillis.

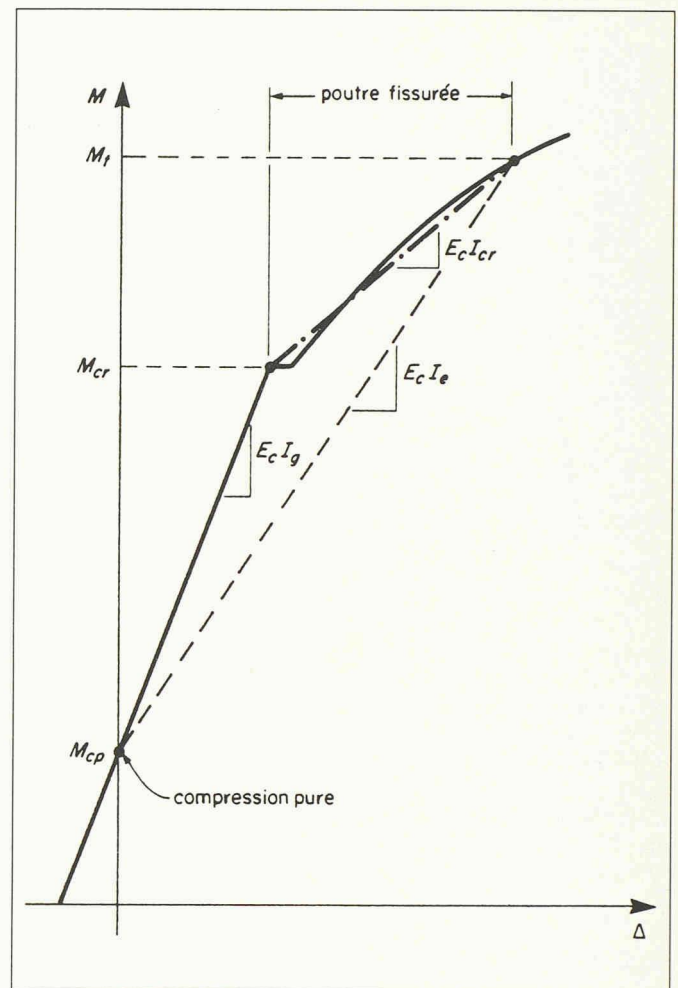


Fig. 12. — Méthode du moment d'inertie effectif et méthode bilinéaire.

Une pièce en béton armé précontraint est fissurée en service normal. Après la fissuration, il n'y a qu'une partie de la section de béton qui est efficace pour réagir aux déformations. Pour le calcul des flèches, on peut utiliser la méthode du moment d'inertie effectif ou la méthode bilinéaire (fig. 12). Ces deux méthodes sont expliquées et comparées dans le chapitre 8.

Le chapitre 9 traite du calcul des zones d'ancrage. Étant donné que l'effort dans un câble de précontrainte est transmis au béton sur une surface dont les dimensions sont relativement faibles par rapport à celles de la surface totale de béton, la précontrainte doit se diffuser verticalement et horizontalement pour s'étendre à toute la section. Le calcul des zones d'ancrage consiste à évaluer l'état de contraintes causé par cette diffusion et, plus particulièrement, les forces de traction résultantes.

Pour le calcul des frettages des zones d'ancrage, il y a trois types d'efforts de traction à considérer: effort d'éclatement, effort de surface et, dans le cas d'une répartition irrégulière des forces de précontrainte sur la face d'about, efforts d'équilibrage. Les méthodes de calcul présentées dans le chapitre 9 permettent de déterminer ces efforts de même que les armatures passives à placer dans les zones d'ancrage.

8. Dimensionnement et vérification des états ultimes

Le dernier chapitre traite du dimensionnement et de l'analyse des pièces travaillant en traction et des pièces travaillant en compression-flexion.

Pour les pièces travaillant principalement en traction, il est préférable que l'état limite de décompression ne soit pas atteint sous les charges d'utilisation normales. Cette condition de même que les limites imposées à la contrainte de compression dans le béton permettent de déterminer l'aire minimale de la section et la force de précontrainte requise.

La fissuration d'une pièce en béton précontraint travaillant surtout en traction est caractérisée par le transfert soudain d'une force de traction du béton à l'acier de précontrainte, ce qui cause une augmentation subite de la contrainte dans l'acier, une destruction de l'adhérence acier-béton près des fissures et une grande diminution de la rigidité axiale. Lorsqu'on vérifie les états limites ultimes, il est donc important de limiter l'augmentation de la contrainte dans l'acier de précontrainte lors de la fissuration de la pièce. Il est souvent nécessaire d'ajouter des armatures passives pour reprendre une partie de la force de traction libérée par le béton.

En plus des équations pour le dimensionnement et la vérification des pièces tendues, le chapitre 10 contient une section traitant du calcul des réservoirs cylindriques en béton précontraint. On y présente entre autres les équations pour le calcul des efforts internes de membrane et des efforts internes parasites résultant des perturbations locales de l'état de membrane.

L'étude d'une pièce travaillant en compression-flexion n'est pas aussi simple que celle d'une pièce travaillant en traction. L'épuisement de la capacité des matériaux demeure un mode de rupture possible mais la rupture par flambement peut survenir avant que la capacité limite des matériaux soit atteinte. La deuxième partie du chapitre 10 est consacrée à l'étude de la résistance et de la stabilité des pièces comprimées et fléchies.

Dans l'étude de la stabilité, il faut considérer non seulement la stabilité de la pièce elle-même, mais également la stabilité globale de la charpente dont fait partie la pièce. Lorsqu'on étudie la stabilité de la pièce elle-même, on s'intéresse à la déformée de la pièce et aux effets de l'effort de compression agissant sur cette déformée. Il s'agit des efforts de deuxième ordre résultant de la déformation propre de la pièce. Lorsqu'on étudie la stabilité d'ensemble de la charpente, on s'intéresse à la déformation latérale de

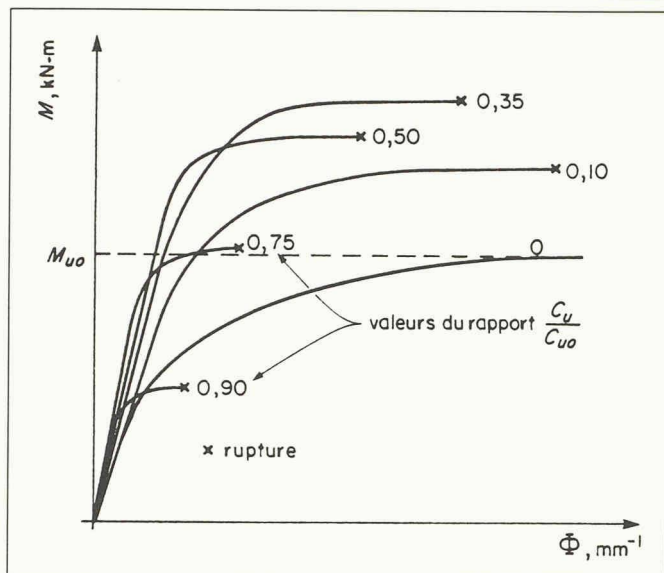


Fig. 13. — Relations moment-courbure d'une section travaillant en compression-flexion.

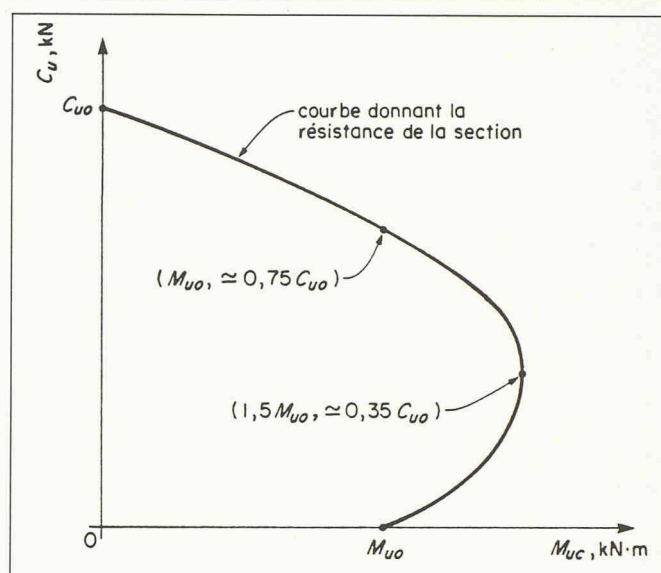


Fig. 14. — Courbe d'interaction flexion-compression obtenue de la figure 13.

la charpente et aux effets des charges de gravité agissant sur la charpente déformée. Il s'agit des efforts de deuxième ordre résultant de la déformation d'ensemble de la charpente. Ces deux types d'efforts du deuxième ordre sont considérés dans le chapitre 10. On y explique également comment déterminer la courbe d'interaction donnant la résistance de la section (fig. 13 et 14). Lorsque le point de résistance maximale ne se situe pas sur cette courbe, on a alors une rupture par flambement.

9. Conclusion

L'une des originalités de l'ouvrage sur le béton précontraint décrit dans cet article est la comparaison de méthodes de calcul

simplifiées à des méthodes plus raffinées. Les hypothèses de chaque méthode de calcul sont mises en évidence et les équations sont présentées de manière à être facilement programmables.

L'appendice du deuxième tome contient la description de deux programmes pour micro-ordinateurs. Toutefois, les nombreux exemples numériques illustrant la théorie ne contiennent que des calculs manuels, lesquels sont essentiels pour acquérir le sens du concret nécessaire à l'emploi des ordinateurs.

Une autre des originalités de l'ouvrage est l'utilisation de la même charpente pour illustrer les diverses étapes du dimensionnement et de l'analyse d'une structure. Il s'agit d'un pont-route à trois travées continues ayant une longueur

L'auteur tient à remercier le professeur Jean-Claude Badoux, de l'EPFL, de sa suggestion de rédiger cet article.

totale de 98 m et une largeur de 13,5 m. Le calcul de ce pont-route est repris dans 17 des 65 exemples que contient le texte.

Ce manuel traitant de béton précontraint a d'abord été écrit pour l'enseignement. Cependant, le praticien familier avec ce matériau y trouvera suffisamment d'informations nouvelles pour approfondir et parfaire ses connaissances.

Adresse de l'auteur :

André Picard, Ph. D., ing.
Département de génie civil
Université Laval
Québec, Canada G1K 7P4

Bibliographie

Ponts haubanés

par René Walther, Bernard Houriet, Walmar Isler et Pierre Moia. — Un vol. 23 × 30 cm de 208 pages, avec plus de 500 photographies, planches, schémas et tableaux, relié toile sous jaquette. Editions Presses polytechniques romandes, 1015 Lausanne, 1985. Prix: Fr. 138.—.

Les ponts haubanés représentent un type de construction encore assez peu connu chez nous, alors qu'il a conquis depuis longtemps ses lettres de noblesse outre-Rhin, notamment sous l'impul-

sion du professeur Fritz Leonhardt.

Depuis plusieurs années, l'Institut de béton armé et précontraint de l'EPFL, auquel appartiennent les auteurs de ce livre, consacre des recherches théoriques et expérimentales intensives aux ponts haubanés. Ils ont en outre participé à l'élaboration du projet de pont haubané sur le Rhin inauguré l'an dernier à Diepoldsau¹.

Ce livre présente un court historique de ce type de pont et fait le point sur l'état actuel des connaissances sur la conception et la

¹ Le pont de Diepoldsau — Conception nouvelle des ponts haubanés à tablier souple, par R. Walther, B. Houriet et P. Moia, IAS n° 22 du 24 octobre 1985.

réalisation de tels ouvrages. A ce titre, il s'adresse aussi bien à l'ingénieur — et même à l'architecte — curieux d'en savoir un peu plus sur des constructions qui frappent par leur élégance moderne qu'au spécialiste qui envisage lui-même la conception.

L'accès et la compréhension du livre sont grandement facilités par les nombreux exemples qu'il présente et qui traitent de tous les problèmes, de la conception et du calcul au montage. Aussi bien les caractéristiques générales que les détails de construction sont présentés de façon fort claire.

Une bibliographie abondante permettra à l'ingénieur de compléter ses connaissances dans nombre d'aspects particuliers des ponts haubanés.

La présentation soignée de ce volume correspond parfaitement à son prix.

Jean-Pierre Weibel

Thermique des nappes souterraines

par André Burger, Edouard Recordon, Daniel Bovet, Louis Cotton et Bernard Saugy. — Un vol. 16 × 24 cm, 268 pages, 145 figures et ta-

bleaux. Editions Presses polytechniques romandes, 1015 Lausanne, 1985. Prix: Fr. 74.— (relié toile).

Le soleil aussi bien que des installations industrielles transmettent de la chaleur au sol, et cette chaleur est véhiculée principalement par l'eau des nappes souterraines; suivant les cas, elle doit être considérée comme une pollution, ou comme une réserve énergétique à exploiter.

Cet ouvrage s'adresse à tous ceux qui s'occupent d'énergie douce ainsi qu'aux administrations chargées de la police des eaux; il répond aux besoins d'un public d'ingénieurs et constitue aussi un livre de base et de référence pour les étudiants avancés et les chercheurs.

Les auteurs se sont proposé de situer la question dans le cadre de l'hydrogéologie; d'énoncer les problèmes mathématiques de manière à bien les poser, et de donner quelques solutions analytiques d'importance exemplaire; de décrire les méthodes de détermination des paramètres physiques en laboratoire; d'appliquer la méthode des éléments finis à l'analyse de divers cas qui se sont présentés dans la réalité.

