Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses

Band: 113 (1987)

Heft: 14

Artikel: Une nouvelle approche du dimensionnement des structures en béton à la fissuration

Autor: Jaccoud, Jean-Paul

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76396

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: 11.01.2026

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

Une nouvelle approche du dimensionnement des structures en béton à la fissuration[1]

par Jean-Paul Jaccoud, Lausanne

Les normes modernes relatives au dimensionnement et à la conception des structures portantes imposent généralement une double vérification de la capacité portante, d'une part, et de l'aptitude au service, d'autre part. En effet, le dimensionnement avec une marge de sécurité suffisante vis-à-vis des sollicitations résultant des charges ne permet souvent pas d'assurer, à lui seul, un comportement également satisfaisant à l'état de service. C'est la raison pour laquelle le projet de norme SIA 162 impose, dans son chapitre « Aptitude au service », entre autres, de nouvelles règles pour le dimensionnement des structures en béton vis-à-vis de la fissuration. Leur élaboration tient compte des récents progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes de fissuration ainsi que des diverses causes et conséquences possibles des fissures. Il en est fort heureusement résulté des règles de dimensionnement pratiques et raisonnables, selon lesquelles il n'est pas nécessaire, dans la plupart des cas, de vérifier explicitement des ouvertures de fissures. La fissuration étant souvent inévitable, ces règles visent à la limiter par des mesures adéquates afin d'éviter l'apparition de fissures isolées et largement ouvertes. Outre diverses mesures constructives ou relatives à la composition et à la cure du béton, ces mesures comprennent essentiellement : a) la limitation des contraintes dans l'armature par suite des sollicitations résultant des charges, b) la mise en œuvre d'une armature minimale lorsque les déformations imposées telles que les variations de température ou le retrait sont entravées.

1. Introduction

Si, pour les ouvrages réalisés en bois ou en pierre, les fissures sont souvent tolérées, voire même acceptées comme élément contribuant au charme de certaines anciennes constructions, il n'en est pas du tout de même pour les ouvrages en béton ! Alors que, pour l'ingénieur, il est normal et dans la nature des choses que le béton soit un matériau pouvant se fissurer, les profanes, qu'ils soient propriétaires ou usagers, estiment au contraire que le béton armé devrait, en tant que matériau moderne, permettre de réaliser des constructions parfaites. Il en résulte que toute fissure est ressentie par ces derniers comme un défaut, voire même comme un danger potentiel. Cette contradiction est à l'origine de nombreux conflits entre constructeurs et propriétaires d'ouvrages en béton dans lesquels apparaissent des fissures. Cela étant dit, notre intention n'est pas de prétendre que l'on devrait éduquer les clients à accepter comme un fait normal l'apparition de n'importe quelles fissures, ni non plus que les ingénieurs devraient réaliser des ouvrages en prenant les mesures propres à éviter toute apparition de fissures. Cela ne serait évidemment pas raisonnable.

L'intention de ce préambule est plutôt de rappeler l'ambiguïté du problème de la fissuration auquel les ingénieurs sont en principe confrontés lors de la réalisation de tout ouvrage en béton. C'est une des raisons pour lesquelles les ingénieurs ont dû, dès les premières applications du béton armé, prendre des dispositions et élaborer des méthodes de dimensionnement en vue de limiter la fissuration éventuelle à une valeur acceptable, c'est-à-dire qui n'affecte que très peu l'usage, la durabilité et la sécurité d'une structure en béton et, surtout, qui ne dérange guère ou n'inquiète pas le profane.

Des nombreux travaux de recherche entrepris dès les années cinquante il est résulté la philosophie du contrôle de la fissuration exposée au chapitre 15 du *Code Modèle CEB-FIP* de 1978 [1][2] et fondée sur les deux points principaux suivants :

1) le calcul des ouvertures de fissures sous l'action des charges, au moyen de formules résultant de la théorie de fissuration ;
2) le contrôle que les ouvertures de fissures calculées sous point 1) ne dépassent pas des valeurs limites spécifiées comprises entre 0,1 et 0,4 mm ; ces valeurs limites étant graduées essentiellement en fonction de critères relatifs au danger de corrosion de l'armature (voir tabl. 1) ou de critères relatifs à l'aspect.

Dans ce qui suit, nous allons toutefois montrer que cette approche – qui, fort heureusement, ne fut pas suivie ni adoptée dans les normes SIA – ne permet pas d'apporter une réponse satisfaisante aux problèmes de fissuration qui se posent dans de nombreux cas de la pratique.

2. Causes de la fissuration

Rappelons les nombreuses et diverses causes de la fissuration, largement décrites entre autres dans le récent *Manuel du CEB : Fissuration et déformations* [2] :

a) le tassement du béton frais ;
b) le retrait plastique ;
c) les déformations imposées telles que :
   - le retrait thermique,
   - le retrait,
   - les variations de température,
   - le tassement des fondations ;
d) les charges ;
e) la corrosion ;
f) des réactions chimiques (alcalis-granulats) ;
g) le gel.

Contentons-nous ici de faire quelques remarques essentielles au sujet de cette énumération.

Premièrement, on constate que parmi les litiges entre propriétaires et constructeurs au sujet de fissures, il est rare que celles-ci aient les charges pour origine. A l'exception des cas où les charges permanentes sont importantes (dalle supportant un remblai de terre par exemple), les

TABLEAU 1. – *Choix des états limites de fissuration à vérifier selon le* Code Modèle CEB-FIP.

Conditions d'exposition	Combinaisons d'actions	acier très sensible à la corrosion	acier peu sensible à la corrosion
non sévères	fréquentes	ouv. des fissures $w_k \leq 0{,}2$ mm	ouv. des fissures $w_k \leq 0{,}4$ mm
	quasi-permanentes	$w_k \leq 0{,}1$ mm ou décompression	aucun contrôle
modérément sévères	fréquentes	$w_k \leq 0{,}1$ mm	$w_k \leq 0{,}2$ mm
	quasi-permanentes	décompression	aucun contrôle
sévères	rares	$w_k \leq 0{,}1$ mm ou formation des fissures	$w_k \leq 0{,}2$ mm ou
	fréquentes	décompression	$w_k \leq 0{,}1$ mm

[1] Texte légèrement modifié d'une conférence présentée le 10 décembre 1986 à l'Office cantonal de la RN5 de Neuchâtel.

[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

fissures donnant lieu à des litiges résultent le plus fréquemment d'entraves aux déformations imposées.
Or, deuxièmement, on doit être conscient du fait que les méthodes et formules indiquées usuellement pour contrôler la fissuration ont été établies pour les cas où la fissuration résulte des charges et qu'elles ne sont donc applicables, en toute rigueur, que dans ces cas.
Quant à la fissuration résultant d'autres causes que les charges ou les déformations imposées, on sait que la présence d'une armature et, surtout, le recours à des formules de fissuration sont sans effet pour s'en prémunir ou en atténuer les conséquences! Dans ces cas-là, il s'agit de prendre des mesures constructives et technologiques appropriées.

3. Motifs du contrôle de la fissuration

Les raisons pour lesquelles il est nécessaire de limiter la fissuration sont de trois ordres:

1) le danger de corrosion des barres d'armature;
2) l'aspect;
3) les exigences fonctionnelles, comme par exemple:
   - l'étanchéité,
   - l'isolation phonique,
   - l'hygiène (absence de fissures dans lesquelles peuvent se loger des microbes pathogènes).

Dans ce qui suit, voyons plus en détail chacun de ces motifs et, surtout, tentons d'indiquer les valeurs acceptables des ouvertures de fissures que l'on peut leur associer.

3.1 *Corrosion des barres d'armature*

Jusqu'à très récemment, une importance prépondante a été accordée au danger de corrosion des barres d'armature pour la fixation de valeurs limites des ouvertures de fissures, largement nuancées selon les conditions d'exposition et la sensibilité à la corrosion des aciers (voir par exemple le tabl. 1 extrait du *Code Modèle CEB-FIP* de 1978). De nombreux travaux de recherche publiés depuis lors ont toutefois montré qu'il n'existait guère de relation entre l'importance de la corrosion et l'ouverture des fissures, tant que celle-ci ne dépasse pas 0,4 à 0,5 mm dans le cas de fissures perpendiculaires aux barres d'armature, ou 0,3 mm dans le cas de fissures se produisant le long des barres.
Les nombreux essais d'exposition réalisés durant plusieurs années ont montré qu'après une phase d'initiation, plus ou moins importante selon que la structure est fissurée ou non, la vitesse de développement de la corrosion durant la phase dite active est quasi indépendante de la largeur des fissures, et cela quelles que soient les conditions d'exposition en atmosphère urbaine normale, en atmosphère industrielle fortement polluée ou en atmosphère maritime. En l'état actuel des connaissances, il n'existe donc aucune base solide pour justifier un éventail des valeurs limites des ouvertures de fissures aussi large que celui indiqué au tableau 1.

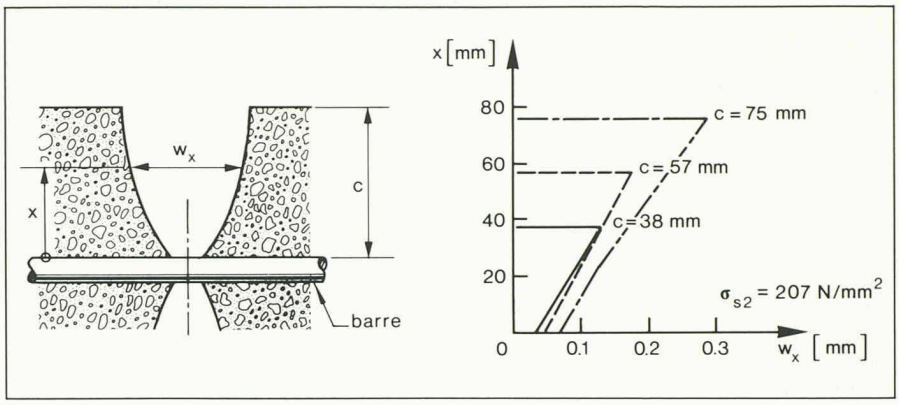


Fig. 1. — Variation de la largeur des fissures en fonction de la profondeur et de l'enrobage.

De plus, il faut constater qu'il n'y a pas de relation directe entre les ouvertures de fissures mesurées à la surface du béton et celles à l'intérieur près des barres d'armature. Diverses recherches, citées par Beeby dans un article de synthèse au sujet de la corrosion des barres d'armature [3], ont montré que les ouvertures de fissures près des barres d'armature étaient souvent considérablement plus faibles que celles mesurées à la surface du béton (fig. 1).
Les recherches réalisées récemment indiquent toutes que c'est la qualité et l'épaisseur du béton d'enrobage qui constituent les paramètres prédominants pour le danger de corrosion des barres d'armature. La durabilité des structures en béton sera donc bien davantage assurée par des mesures technologiques et constructives visant à permettre la mise en œuvre d'un béton d'enrobage d'excellente qualité et d'épaisseur suffisante [4], plutôt que par le calcul et une limitation sévère de l'ouverture des fissures.
Dans le cas des armatures passives, le risque lié à la corrosion ne réside que rarement dans une réduction de la sécurité des structures. En effet, bien avant que la corrosion soit suffisamment avancée pour affaiblir notablement les sections d'acier, elle se manifeste par des désordres et dégâts importants affectant de manière inacceptable l'aspect de la structure (traînées de rouille, fissuration, éclatement du béton d'enrobage) et nécessitant des mesures d'assainissement. Par contre, dans le cas des armatures précontraintes, le risque de diminution de la capacité portante lié à la corrosion est plus élevé (corrosion sous tension) et justifie une limitation plus sévère de l'ouverture des fissures, ainsi qu'un enrobage de béton plus important, afin d'empêcher la dépassivation du béton ou du mortier d'injection entourant l'armature précontrainte. Il est indiqué de limiter l'ouverture maximale des fissures à 0,2 mm et même d'empêcher toute ouverture permanente des fissures au niveau de l'armature précontrainte.

3.2 *Aspect*

Les propriétaires et les usagers d'un ouvrage en béton, ainsi que le public en général sont très sensibles aux atteintes à l'aspect que constitue l'apparition de fissures, surtout lorsqu'elles sont importantes. Il est évident que la valeur des ouvertures de fissures acceptable du point de vue de l'aspect dépend de nombreux facteurs tels que la texture des parements de béton (surface lisse ou rugueuse, béton lavé, etc.), les conditions d'éclairage, l'éloignement d'un observateur éventuel, la sensibilité de perception des défauts — qui est très subjective car elle dépend de l'observateur. Ce dernier facteur est en outre fonction de la destination de l'ouvrage et du niveau de qualité auquel s'attend son utilisateur.

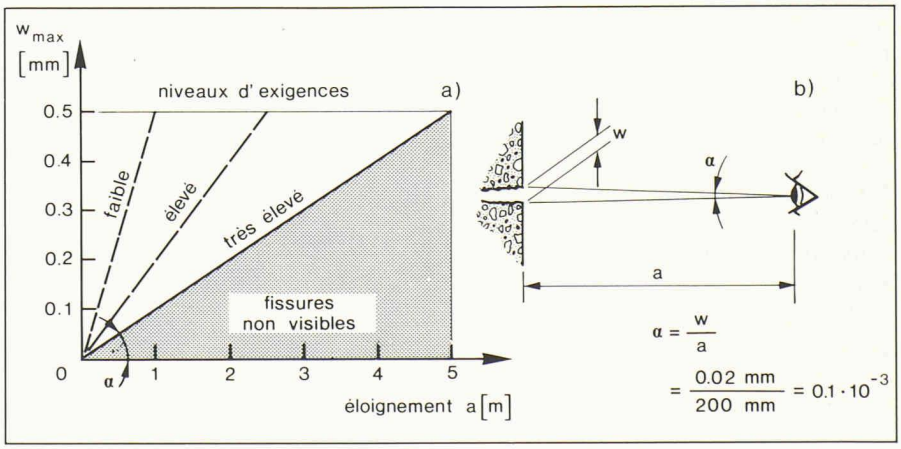


Fig. 2. — Valeurs indicatives des ouvertures de fissures acceptables du point de vue de l'aspect.

Les quelques recherches réalisées à ce sujet, notamment par Padilla et Robles [5], ainsi que les connaissances empiriques résultant des réclamations constatées dans les bâtiments semblent indiquer que des fissures dont l'ouverture ne dépasse pas 0,3 mm n'inquiètent guère les usagers et le public. Ceux-ci deviennent particulièrement sensibles, voire même inquiets, lorsque les fissures sont plus importantes et se transforment en véritables fentes (de largeur supérieure à 0,5 mm et pouvant atteindre plusieurs millimètres dans certains cas).

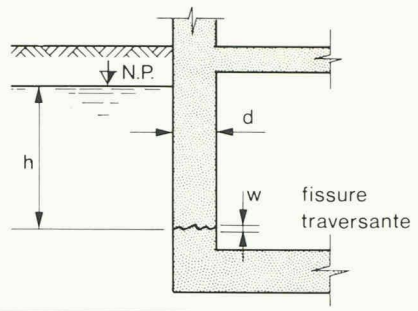
Comme l'a notamment suggéré Kupfer [6], il semble approprié de définir les valeurs limites des ouvertures de fissures acceptables du point de vue de l'aspect en fonction de l'éloignement et du niveau d'exigences, selon la destination ou l'usage de l'élément de structure considéré (fig. 2). Il paraît raisonnable de faire coïncider le niveau d'exigences le plus élevé avec l'angle limite $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ correspondant à une acuité visuelle normale.

Aux considérations précédentes on doit toutefois ajouter que les fissures, même dans le cas de très faibles ouvertures, peuvent parfois être soulignées et avoir un effet très néfaste sur l'aspect, à cause des salissures qui s'y accumulent ou à cause de légers suintements d'eau et d'humidité.

3.3 *Etanchéité*

Le problème de l'étanchéité d'un ouvrage en béton dépend naturellement en premier lieu de la nature du fluide à retenir. Le problème se pose en outre à deux niveaux différents : d'une part, il y a celui de l'étanchéité du matériau béton supposé non fissuré et, d'autre part, il y a celui du béton fissuré, où la question principale réside alors dans la valeur limite des ouvertures de fissures qu'il ne faut pas dépasser. En l'état actuel des connaissances, il semble difficile d'indiquer avec certitude ces valeurs limites, car il n'existe pas de méthode unanimement reconnue pour les déterminer. Le problème est, en effet, très complexe et dépend de nombreux paramètres tels que la pression hydrostatique et l'épaisseur de l'élément fissuré, ainsi que d'autres, plus difficilement maîtrisables, comme la forme et la rugosité des lèvres des fissures. La figure 1 montre en effet que la largeur d'une fissure en surface n'est pas du tout représentative de la largeur moyenne en profondeur, qui est déterminante pour calculer le débit des fuites éventuelles au travers de la fissure. Il va de soi que seules les fissures traversantes posent un problème vis-à-vis d'éventuelles infiltrations.

Diverses études et publications récentes [6] et [7] ainsi que des observations sur des ouvrages réalisés, notamment par Falkner [8], ont montré que l'apparition de fines fissures traversantes, dont l'ouverture en surface ne dépasse pas 0,1 à 0,2 mm, n'altérait pas l'étanchéité à l'eau de structures en béton armé (fig. 3). De telles fissures, même si elles laissent suinter un peu d'eau immédiatement après leur apparition, sont en effet capables de s'autocolmater après quelques heures ou quelques jours, d'une part chimiquement, en raison de l'hydratation complémentaire du ciment et, d'autre part, en raison du gonflement du béton en présence d'eau ou d'humidité. Relevons toutefois qu'en l'état actuel des connaissances, les valeurs limites données à la figure 3 doivent être considérées avec prudence et plutôt comme des valeurs indicatives.



gradient de pression h/d	ouverture des fissures w [mm]
2,5	≤ 0,20
5	≤ 0,15
10	≤ 0,10
20	≤ 0,05

Fig. 3. – Valeurs indicatives des ouvertures de fissures permettant d'assurer l'étanchéité à l'eau, selon Lohmeyer [7].

4. Nouvelle approche du contrôle de la fissuration

4.1 *Principes*

Compte tenu des diverses raisons invoquées ci-dessus, les chercheurs, les ingénieurs et les commissions de norme, tant sur le plan suisse (SIA) que sur le plan international (CEB), ont pris conscience, ces dernières années, de la nécessité qu'il y a de modifier la philosophie du dimensionnement des structures en béton à l'égard de la fissuration [9]. Il est ainsi généralement admis que, pour les ouvrages courants, qui constituent la majorité des cas dont s'occupent les ingénieurs, il n'est pas nécessaire de calculer et limiter explicitement les ouvertures de fissures. L'apparition de petites fissures, dont l'ouverture ne dépasse pas 0,2 à 0,5 mm, n'est en effet pas trop préjudiciable pour l'usage, la durabilité ou l'aspect d'une structure. Ce qui est indispensable, c'est d'éviter l'apparition de fissures incontrôlées et largement ouvertes (c'est-à-dire de fentes). Dans ce cas, les mesures suivantes permettent d'assurer un contrôle efficace de la fissuration :

- des mesures d'ordre constructif et technologique destinées à diminuer, voire à supprimer, les déformations entravées (par exemple composition et cure appropriée du béton, étapes de bétonnage, joints de contraction) ;
- la mise en place d'une armature adhérente minimale, dans toutes les parties de structure en béton armé ou précontraint dans lesquelles des contraintes de traction peuvent résulter de l'entrave aux déformations imposées, telles que la température, le retrait ou des tassements d'appuis ;
- une répartition appropriée des barres d'armature (limitation des espacements ou des diamètres) et une limitation des contraintes dans les barres, calculées en stade fissuré sous les sollicitations résultant de la part permanente des actions directes (c'est-à-dire des charges).

L'armature minimale constitue l'apport principal de cette nouvelle philosophie et résulte notamment des travaux de recherches de Falkner [10] ainsi que, plus récemment, de ceux de Jaccoud [11], [12]. Cette armature minimale doit être dimensionnée de façon que :

- d'une part, elle ne soit pas plastifiée sous l'effort de traction correspondant à l'apparition des premières fissures ; il s'agit de la condition essentielle pour éviter l'apparition de larges fissures isolées, d'ouvertures supérieures à 0,5 mm ;
- d'autre part, elle soit capable de maintenir l'ouverture des fissures à un niveau acceptable ; il s'agit d'une condition accessoire, souvent plus sévère que la précédente et qui peut, le cas échéant, être graduée en fonction du niveau d'exigences requis.

Il est évident que, dans les limites imposées par les exigences fonctionnelles ou relatives à la durabilité, le choix et la fixation du niveau d'exigences sont pour une grande part subjectifs et n'ont donc pas de valeur universelle. Ce choix dépend du niveau de qualité que l'on attend d'un ouvrage, c'est-à-dire de l'ouverture des fissures que l'on juge tolérable, ainsi que du prix que l'on est prêt à payer pour obtenir cette qualité.

Remarquons qu'une armature minimale n'est pas toujours indispensable. Dans certains cas, on peut se contenter de ne placer qu'une armature constructive, inférieure à l'armature minimale, ou même renoncer à toute armature. C'est notamment le cas lorsque le risque d'apparition de fissures incontrôlées a été fortement réduit, voire éliminé, par l'adoption de mesures appropriées visant à diminuer ou à supprimer les déformations imposées ou, au contraire, lorsque l'on accepte le risque d'apparition de telles fissures qui, le cas échéant, seront colmatées ultérieurement.

Enfin, dans certains cas spéciaux, il peut se révéler nécessaire, pour des raisons fonctionnelles (comme par exemple assurer l'étanchéité à des fluides), de prendre des mesures appropriées afin de limiter plus sévèrement l'ouverture des fissures, voire d'empêcher leur apparition. Outre l'emploi éventuel de la précontrainte, on pourra dans ces cas-là prévoir une armature supérieure à l'armature minimale, dont le dimensionnement s'effectuera en recourant aux équations de la théorie de fissuration afin d'effectuer un contrôle explicite des ouvertures de fissures.
Relevons que cette nouvelle approche de la fissuration a été prise en compte dans divers travaux de normalisation récents ou actuellement en cours [13], [14], [15].

4.2 *Projet de norme SIA 162*

Nous donnons ici un aperçu des paragraphes du *Projet de norme SIA 162* [15] traitant de la fissuration, au sein de l'important et nouveau chapitre intitulé «Aptitude au service». Rappelons que sa rédaction a été grandement inspirée des principes évoqués précédemment.

Exigences requises

La norme fait la distinction entre trois niveaux d'exigences requises:

Le niveau d'*exigences normales* sera requis en général pour les éléments de structures situés à l'intérieur ou à l'abri des intempéries et lorsque les exigences relatives à l'aspect sont peu importantes: c'est notamment le cas lorsque l'élément considéré est éloigné d'un observateur éventuel, ou qu'il en est caché par un élément non porteur tel que galandage, faux-plafond, etc.
Le niveau d'*exigences élevées* sera requis pour les éléments de structures situés à l'extérieur et exposés aux intempéries, ainsi que lorsque l'élément considéré est situé à proximité d'un observateur éventuel et que les exigences relatives à l'aspect sont élevées.
Le niveau d'*exigences spéciales* peut être requis pour des ouvrages particuliers, par exemple lorsqu'une étanchéité parfaite est exigée, en cas d'exigences très sévères relatives à l'aspect pour certains ouvrages de prestige, ou lorsque les actions variables sont prépondérantes (précontrainte totale dans le cas des ponts de chemin de fer).

Mesures destinées à limiter l'ouverture des fissures

La norme dresse un inventaire des diverses mesures permettant de réduire la fissuration:

- la mise en œuvre d'une précontrainte (notons qu'encore faut-il que le raccourcissement longitudinal ne soit pas entravé, pour que celle-ci soit pleinement efficace);
- les mesures constructives destinées à diminuer ou à supprimer les effets résultant de l'entrave aux déformations imposées (joints);
- les mesures technologiques prises lors de l'étude ou lors de l'exécution visant à réduire les déformations imposées (composition du béton, étapes de bétonnage, cure);
- la mise en place d'une armature adhérente appropriée: c'est-à-dire d'une armature constructive ou minimale, dans le cas de sollicitations résultant de l'entrave aux déformations imposées; ou capable de limiter les contraintes dans l'armature sous les sollicitations dues aux charges.

Armature minimale

Lorsque les déformations imposées sont entravées, on évitera l'apparition de larges fissures isolées, par la mise en œuvre d'une armature constructive disposée de manière adéquate et constituée de barres à haute adhérence, cela aussi bien dans les structures en béton armé que dans celles en béton précontraint. A cet effet, on pourra adopter une armature minimale dont la section est définie par l'expression:

$$A_{s,\min} = \gamma \cdot \frac{\alpha \cdot \beta \cdot f_{ct} \cdot A_{ct}}{f_y}$$

qui constitue une condition de non-plastification de l'armature, modifiée par certains facteurs permettant de tenir compte du niveau d'exigences requis et des principaux paramètres influençant la fissuration.
Dans cette expression:

f_y est la valeur nominale de la limite d'écoulement de l'acier d'armature, bornée supérieurement à 460 N/mm²; on n'est donc pas autorisé à exploiter pleinement la capacité des aciers de résistance supérieure S 500, car leur qualité d'adhérence n'augmente pas avec la résistance;

f_{ct} est la valeur nominale (valeur moyenne à l'âge de 28 jours) de la résistance du béton à la traction, avec les valeurs suivantes à titre d'exemple:

Type de béton	f_{ct} [N/mm²]
B 30/20	2,1
B 35/25	2,4
B 40/30	2,7
B 45/35	3,0

A_{ct} est l'aire conventionnelle de la partie tendue de la section de béton, définie à la figure 4;

α est un facteur permettant de tenir compte de l'influence de l'espacement des barres d'armature s:

s [mm]	α
≦100	1,0
150	1,1
200	1,2
250	1,3
300	1,4

β est un facteur permettant de définir l'effort de traction correspondant à la fissuration, compte tenu de la répartition des contraintes dans la section (voir fig. 4); il tient compte notamment de la forme du diagramme des contraintes ainsi que de l'effet réducteur dû à la présence de contraintes autoéquilibrées au sein des sections;

γ est un coefficient permettant de tenir compte du niveau d'exigences requis:

Exigences	γ
normales	1,0*
élevées	1,3

*valeur indicative en cas d'exigences normales

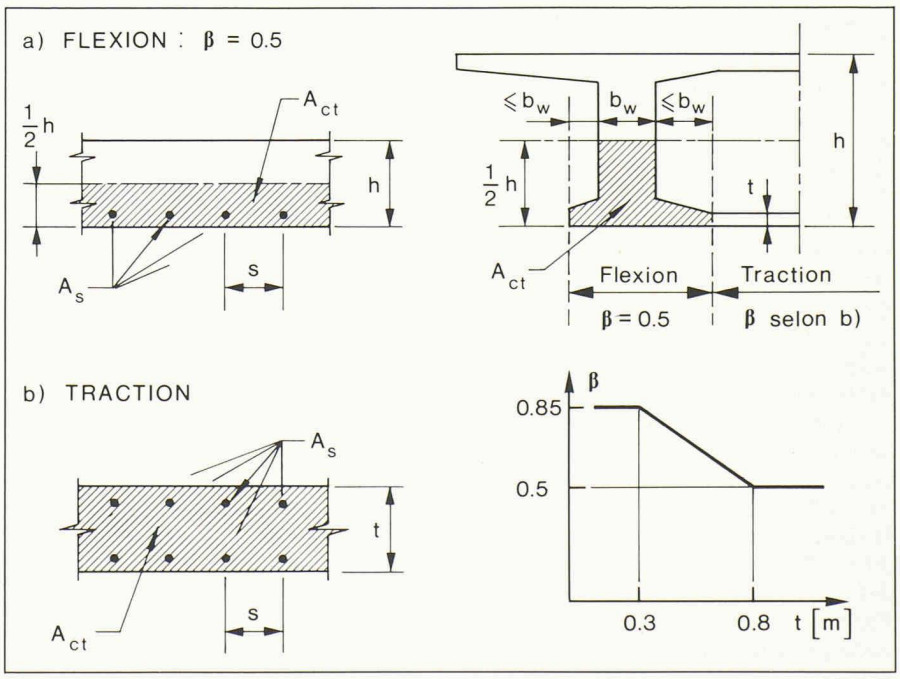


Fig. 4. — Définitions conventionnelles de l'aire de la section de béton tendu A_{ct} et du facteur β.

Limitation des contraintes

En cas d'exigences élevées, la norme impose une double vérification des contraintes dans les armatures, calculées en stade fissuré sous les sollicitations résultant des charges.

Premièrement, les contraintes calculées dans l'armature, sous l'action des charges permanentes et des charges variables agissant à long terme, doivent être limitées en fonction de l'espacement des barres s et de la hauteur ou épaisseur h selon la figure 5. Relevons que le but de cette vérification est de limiter l'ouverture des fissures en service, sous les charges de longue durée, qui sont généralement déterminantes pour l'aspect et la durabilité des structures.

Deuxièmement et subsidiairement, on doit vérifier que les contraintes calculées dans l'armature, sous le cumul des charges permanentes et des charges variables, ne dépassent pas la valeur suivante:

$$\sigma_{s\max} \leqq 0{,}95\, f_y - 100 \text{ N/mm}^2$$

Le but de cette limitation est de conférer à l'armature une réserve de déformation suffisante, pour éviter qu'elle ne puisse être plastifiée en service, sous le cumul de toutes les charges et des déformations imposées, au cas où ces deux types d'actions agiraient simultanément.

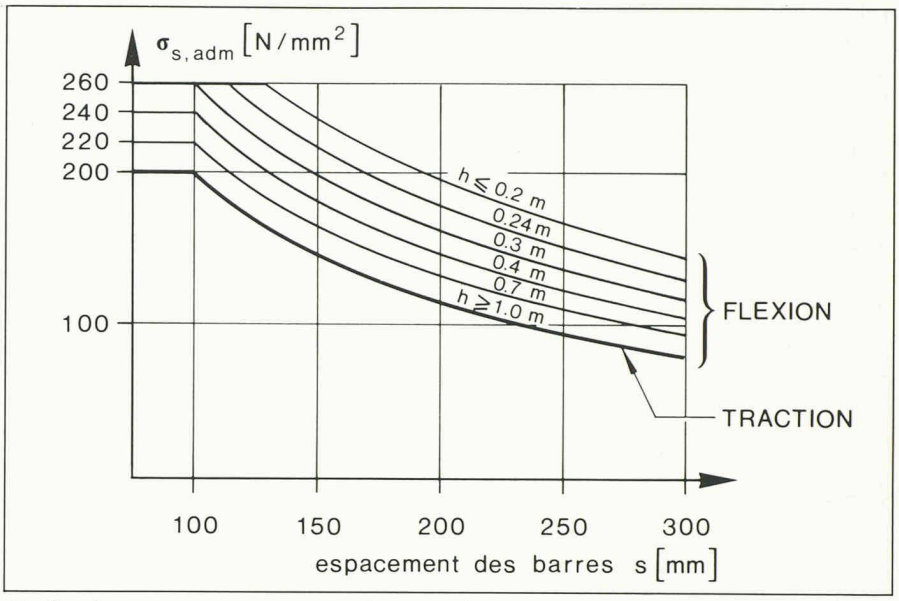


Fig. 5. — Contraintes admissibles dans l'armature à l'état de service sous les sollicitations résultant des charges de longue durée.

5. Applications

Le chapitre relatif au contrôle de la fissuration dans le *Projet de norme SIA 162* [15] ayant été succinctement présenté, nous nous proposons maintenant d'illustrer à l'aide d'exemples le point essentiel et nouveau que constitue la mise en œuvre d'une armature minimale.

Premier exemple

Soit un balcon réalisé en faisant s'avancer en porte à faux, au-delà du mur de façade, la dalle d'étage d'un bâtiment (fig. 6). L'expérience a montré que, dans un tel cas, de larges fentes transversales apparaissaient à coup sûr si l'on n'avait pas prévu des joints suffisamment rapprochés ou si l'on n'avait pas placé une forte armature longitudinale. Calculons les contraintes longitudinales de traction qui peuvent apparaître dans cette dalle de balcon réalisée sans joint, par suite des variations climatiques.

Le raccourcissement de la dalle de balcon, résultant de son refroidissement en hiver, est empêché par sa continuité avec la dalle à l'intérieur du bâtiment. La déformation relative empêchée vaut:

$$\varepsilon_{imp} = \alpha_T \cdot \Delta T = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 30 = 0{,}3 \cdot 10^{-3}$$

En admettant un module du béton E_c égal à 20 kN/mm², les contraintes de traction qui en résultent valent:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_{imp} = 20 \cdot 10^3 \cdot 0{,}3 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ N/mm}^2$$

d'où l'apparition certaine de fissures. Pour que cette fissuration soit contrôlée et pour éviter l'apparition de larges fentes espacées, telles que celles esquissées à la figure 6, il est nécessaire de placer dans le sens longitudinal une armature minimale. En admettant l'emploi d'un béton de type B 35/25 et d'armature en acier à haute adhérence de type S 500, on obtient, pour le niveau d'exigences élevées requis ici:

$$\varrho_{\min} = \frac{A_{s,\min}}{A_{ct}} = \gamma \cdot \frac{\alpha \cdot \beta \cdot f_{ct}}{f_y} = 1{,}3 \cdot \frac{\alpha \cdot 0{,}85 \cdot 2{,}4}{460} = \alpha \cdot 0{,}0058$$

Selon l'espacement des barres s adopté, l'armature minimale longitudinale qu'il est nécessaire de répartir sur les deux faces inférieure et supérieure est indiquée au tableau 2.

Deuxième exemple

Soit le mur de sous-sol d'un bâtiment industriel représenté en coupe à la figure 7. Supposons le bâtiment réalisé sans joint sur 80 m de longueur. En l'absence de mesures adéquates prises lors de l'exécution et visant à réduire les déformations entravées, on peut être certain que la chaleur d'hydratation et le retrait donneront naissance à des contraintes de traction suffisamment élevées pour provoquer l'apparition de fissures. De la même manière que dans l'exemple précédent, il est nécessaire de placer horizontalement dans ce mur une armature minimale, apte à contrôler la fissuration. En admettant l'emploi d'un béton B 35/25 et d'armature à haute adhérence de type S 500, ainsi que le niveau d'exigences normales comme suffisant, l'armature minimale recommandée vaut:

$$\varrho_{\min} = \frac{A_{s,\min}}{A_{ct}} = \gamma \cdot \frac{\alpha \cdot \beta \cdot f_{ct}}{f_y} = 1{,}0 \cdot \frac{\alpha \cdot 0{,}64 \cdot 2{,}4}{460} = \alpha \cdot 0{,}0033$$

Selon l'espacement des barres s choisi, l'armature minimale horizontale qu'il est recommandé de répartir sur les deux faces du mur est indiquée au tableau 3.

6. Conclusion

En guise de conclusion, nous pouvons relever trois aspects positifs extrêmement importants de cette nouvelle approche du dimensionnement des structures en béton vis-à-vis de la fissuration.

Elle devrait permettre d'améliorer l'image de marque des structures en béton, en évitant le danger d'apparition de larges fissures isolées dommageables quant à leur aspect, à leur usage ou à leur durabilité.

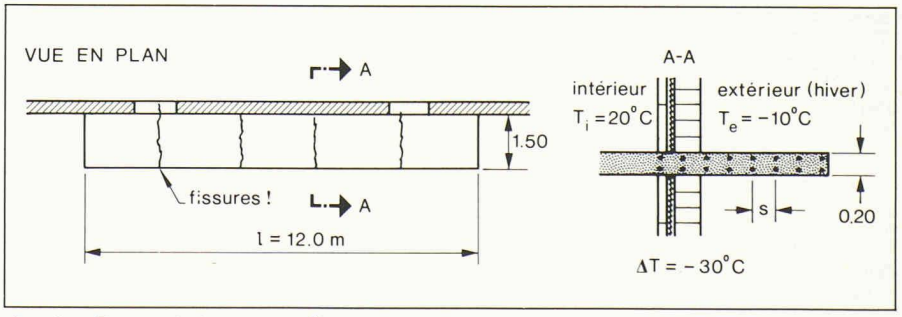


Fig. 6. — Danger de fissuration d'une dalle de balcon.

TABLEAU 2. – *Armature longitudinale minimale dans la dalle de balcon représentée à la figure 6.*

s [mm]	α	ρ_{min}	$A_{s,min}$ [mm²/m']	Barres Ø [mm]
100	1,0	0,0058	1'153	8 (10)
150	1,1	0,0063	1'268	10 (12)
200	1,2	0,0069	1'384	14

TABLEAU 3. – *Armature longitudinale minimale dans le mur représenté à la figure 7.*

s [mm]	α	ρ_{min}	$A_{s,min}$ [mm²/m']	Barres Ø [mm]
100	1,0	0,0033	2'004	12
150	1,1	0,0037	2'204	14 (16)
200	1,2	0,0040	2'404	18
250	1,3	0,0043	2'604	20 (22)

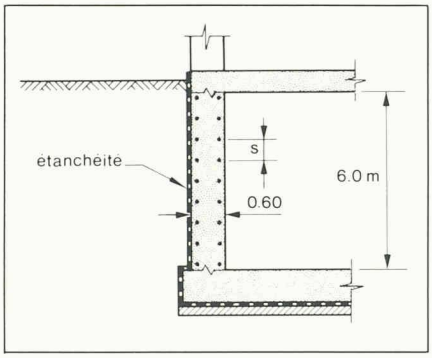


Fig. 7. – Coupe en travers d'un sous-sol de bâtiment.

A cet effet, elle met à disposition des ingénieurs un concept clair ainsi que des moyens pratiques qui devraient faciliter grandement les calculs de dimensionnement et de vérification.

De plus, elle offre des perspectives nouvelles aux ingénieurs pour la conception et la réalisation d'ouvrages en béton armé de grandes dimensions avec des joints très espacés, voire sans joint du tout. De telles réalisations existent et se comportent de manière satisfaisante, conformément aux prévisions [8].

Il va de soi que cette amélioration de la qualité des structures en béton à l'état de service, notamment par la mise en œuvre d'une armature minimale, peut avoir certaines répercussions économiques. Il ne faut toutefois pas en surestimer l'importance. Dans de nombreux cas, les coûts globaux et à long terme ne sont que très peu augmentés, voire même peuvent être réduits si l'on tient compte, d'une part, de la réalisation plus simple et plus rapide due entre autres à la diminution, voire à l'absence de joints permanents, ainsi qu'à la possibilité de renoncer dans certains cas à la mise en œuvre d'une étanchéité extérieure et, d'autre part, si l'on tient compte de frais d'entretien et de réparation éventuels souvent plus favorables.

Adresse de l'auteur:
Jean-Paul Jaccoud, ing. civil,
dipl. EPFL-SIA, Dr es. sc. techn.
Collab. scientifique à l'EPFL-IBAP
1015 Lausanne

Bibliographie

[1] *Code Modèle CEB-FIP pour les structures en béton*, Bulletin d'information N° 124/125-F, avril 1978.
[2] *Manuel du CEB: Fissuration et déformations*, FAVRE, R.; BEEBY, A. W.; FALKNER, H.; KOPRNA, M.; SCHIESSL, P.; JACCOUD, J.-P.: Bulletin d'information N° 158-F, EPF-Lausanne, 1983.
[3] BEEBY, A. W.: «Cracking, cover and corrosion of reinforcement», *Concrete international*, février 1983.
[4] *CEB: Durability of concrete structures*, Bulletin d'information N° 148, State-of-the-Art Report, février 1982.
[5] PADILLA, J. D. & ROBLES, F.: *Human response to cracking in concrete slabs. Cracking, déflection and ultimate load of concrete slab systems*, Publication SP-30, ACI, 1971.
[6] KUPFER, H.: *Kriterien der Rissbreitenbeschränkung*, Vortrag am Deutschen Betontag 1985, Deutscher Beton-Verein.
[7] LOHMEYER, G.: «Wasserundurchlässige Betonbauwerke, Gegenmassnahmen bei Durchfeuchtungen», *Beton* 2/1984.
[8] FALKNER, H.: *Fugenlose und wasserundurchlässige Stahlbetonbauten ohne zusätzliche Abdichtung*, Vortrag am Deutschen Betontag 1983, Deutscher Beton-Verein.
[9] BEEBY, A. W.; SCHIESSL, P.; JACCOUD, J.-P.: «A modified approach for design against cracking», *Periodica AIPC* (en préparation).
[10] FALKNER, H.: «Zur Frage der Rissbildung durch Eigen- und Zwängsspannungen infolge Temperatur in Stahlbetonbauteilen», *DAfst*, Heft 208, 1969.
[11] JACCOUD, J.-P. et al.: *Armature minimale pour le contrôle de la fissuration*, rapports d'essais EPFL-IBAP, 3 vol., 1984-1986.
[12] JACCOUD, J.-P.: *Armature minimale pour le contrôle de la fissuration, des structures en béton*, thèse de doctorat EPFL (N° 666, 1987).
[13] *DBV-Merkblatt*, «Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau», Groupe de travail: FALKNER, FEHLING, FRÖHNER, HOLZ, JECHE, JUNGWIRTH, KÖNIG, LITZNER, MEISSNER, ROSTASY, SCHIESSL, THIELEN: Deutscher Beton-Verein, avril 1986.
[14] *Nouveau Code Modèle CEB 1990* (en préparation).
[15] *SIA 162-E: Structures en béton. Projet de nouvelle norme N 5222-5*, novembre 1986. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich (parution prévue en 1988).

Bibliographie

Initiation aux probabilités

par *Sheldon M. Ross*. – Un vol. 16 × 24 cm, 416 pages. Presses polytechniques romandes, Lausanne 1987. Prix: Fr. 69.– (broché).

Le livre de Sheldon M. Ross, paru en version anglaise dans une première édition en 1976, a eu un succès immédiat. Il est utilisé dans nombre d'universités américaines comme livre de base dans les premiers cours sur la théorie des probabilités destinés aux étudiants des sciences mathématiques et des sciences de l'ingénieur.

En 1984 fut éditée une version élargie, objet de cette traduction. L'auteur s'attache tout particulièrement à illustrer les notions théoriques par des exemples concrets. De plus, chaque chapitre contient une série d'exercices théoriques et de problèmes issus de tous les domaines où les probabilités sont appliquées. Au total, le livre contient plus de 700 exemples et exercices.

La notion de probabilité conditionnelle est traitée de façon plus rigoureuse que dans des textes comparables. Une attention particulière est accordée aux théorèmes limites, ce noyau essentiel de tout traitement sérieux des probabilités.

Les connaissances préalables à la lecture de cet ouvrage sont limitées à l'analyse élémentaire.

Le style lucide et le rythme bien adapté aux étudiants abordant un premier cours de probabilité ont certainement contribué au succès de ce livre.

Ouvrages reçus

Cent ans de conservation des monuments au sein de la Confédération. Publication de la Société d'histoire de l'art en Suisse et du Département fédéral de l'intérieur, en mémoire de l'entrée en vigueur des bases légales de la conservation des monuments historiques de la Confédération, le 25 février 1887. Réalisé en collaboration avec l'Office fédéral de la culture et avec l'appui de la Confédération, ce cahier présente les articles de membres de la Commission fédérale pour la conservation, de représentants des instances fédérales chargées de la conservation des monuments, enfin de conservateurs des cantons et des communes, qui parlent de leur travail quotidien. De format A5, cette brochure peut être obtenue gratuitement auprès de l'Office fédéral de la culture, 3000 Berne 6.