

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 127 (2001)
Heft: 03

Artikel: Fissuration, étanchéité et durabilité des structures en béton armé
Autor: Laurencet, Pierre / Jaccoud, Jean-Paul
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80020>

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: 06.10.2024

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

Fissuration, étanchéité et durabilité des structures en béton armé

(BÉTON ARMÉ)

La fissuration des ouvrages en béton armé est une question de la plus haute actualité. Car si les causes du phénomène et les mécanismes en jeu sont relativement bien connus aujourd'hui, la fixation de valeurs limites admissibles pour l'étendue de la fissuration - compte tenu de la fonction et de la pérennité d'un ouvrage - demeure fortement controversée. Rappelons succinctement que la fissuration peut être d'origine mécanique, physique ou chimique. Il en résulte des types de fissures extrêmement variables, de typologie complexe, qui, en fonction notamment de leur exposition, sont plus ou moins préjudiciables à la bonne tenue dans le temps de l'ouvrage. Les fissures, au sens large, peuvent être observées au niveau de la microstructure du grain de ciment hydraté (*micro-level*), au niveau de la pâte de ciment enrobant les granulats (*meso-level*), ainsi qu'au niveau global de l'élément de structure (*macro-level*). Toutes ces fissures ont une influence sur les propriétés du béton. Dans ce qui suit, il sera essentiellement question de macro-fissures structurelles, résultant des sollicitations s'appliquant à un ouvrage.

La présence de fissures peut, à terme, porter préjudice aussi bien à la durabilité, à la fonction (essentiellement sur le plan de l'étanchéité et de la compatibilité avec les finitions), qu'à l'aspect d'un ouvrage. Ces trois motifs sont en outre fortement interdépendants (fig.1). Ainsi, l'aspect d'une structure fissurée est davantage affecté en présence d'eau due à un manque d'étanchéité; il en résulte des coulures peu esthétiques sur les parements. Quant à la durabilité d'une structure fissurée, comme nous tenterons de le montrer ci-dessous, elle dépend fortement de la capacité de l'eau à traverser les fissures, c'est-à-dire de l'étanchéité de ladite structure. Enfin, pour une structure en béton par exemple, la compatibilité avec les finitions concerne la mise en place d'une étanchéité extérieure - à fonction non porteuse et à plus ou moins forte capacité de pontage des fissures - ou le choix de traiter ultérieurement les fissures risquant d'apparaître.

1. Approche actuelle

Trop souvent encore, dans les normes et les règlements, la notion de contrôle de la fissuration n'est abordée que sous le seul point de vue de l'ouverture des fissures [16, 17, 19]¹. On constate que les problèmes liés à la fissuration du béton armé, quelle que soit leur nature, y sont maîtrisés par la seule mise en œuvre d'une certaine quantité d'armature dite «minimale», armature dont le but est de répartir la fissuration, c'est-à-dire de garantir un grand nombre de fissures faiblement ouvertes. Les règlements fixent pour les ouvertures admissibles les valeurs maximales ou caractéristiques suivantes:

1) Norme SIA 162 [19], exigences accrues: $w_k = 0,4 \div 0,5$ mm; exigences sévères: $w_k = 0,2 \div 0,25$ mm.

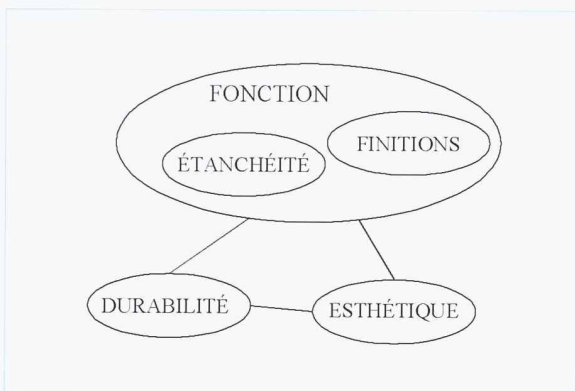
Il est en outre précisé dans des recommandations éditées par la SIA [20] que des fissures traversantes, avec environ $w_k = 0,1$ mm dans lesquelles l'eau peut circuler, constituent un risque plus élevé vis-à-vis de la corrosion.

2) Eurocode 2 [16, 17] béton armé: $w_k = 0,3$ mm; béton précontraint: $w_k = 0,2$ mm.

Il est à relever que l'Eurocode 2 (dans sa partie 4 consacrée aux structures de soutènement et aux réservoirs [18]) spécifie que, lorsqu'une étanchéité globale et relative est recherchée, les ouvertures des fissures doivent être limitées à $w_k = 0,2$ mm si l'auto-colmatage est possible - c'est-à-dire, au sens de l'Eurocode, si les variations de déformation imposée sont inférieures à 0,15 ‰ - et $w_k = 0,1$ mm si l'auto-colmatage n'est pas possible (voir 2.3.2). Il y est ajouté qu'au cas où une étanchéité locale et absolue (débit = 0) est recherchée, il s'agira de faire en sorte que l'élément ne soit pas fissuré de façon traversante, en l'absence d'autres mesures (revêtement étanche, traitement des fissures).

Historiquement, la notion d'armature minimale a rendu de grands services en ce sens qu'elle a forcé les concepteurs à disposer une certaine quantité d'armature dans leurs ouvrages. Aujourd'hui cependant, dans un contexte technico-économique différent, il apparaît de plus en plus que cette approche «armature minimale» de la fissuration n'est pas suffisamment nuancée. Si, dans de nombreux cas, la mise en

¹ Les chiffres entre crochets renvoient aux références en fin d'article.



œuvre d'armature couplée à d'autres mesures (étanchéité extérieure, traitement des fissures) est certes pleinement justifiée, elle peut parfois s'avérer contraire aux impératifs économiques, voire aux exigences attachées au fonctionnement et à la pérennité à long terme des ouvrages.

Dans le présent article, nous souhaitons principalement montrer, de façon non exhaustive, que le contrôle de la fissuration des ouvrages ne doit pas se borner exclusivement à limiter l'ouverture des fissures.

2. Durabilité et étanchéité des structures fissurées

2.1 Généralités

Le matériau béton est extrêmement résistant aux agressions émanant de l'environnement. Il suffit pour s'en convaincre d'observer la tenue des ouvrages romains qui ont perduré jusqu'à nos jours. Pourtant, qu'il s'agisse du ciment, du sable, des granulats, de l'acier d'armature ou des câbles de précontrainte, tous les composants d'un ouvrage en béton peuvent subir des dégradations à plus ou moins brève échéance. Quand elles se produisent, certaines de ces altérations peuvent grandement nuire à la pérennité d'une structure, voire la mettre en péril. Principalement, d'ordre physique (cycles de gel et dégel, érosion) ou chimique (attaque de substances acides, de sulfates, d'alcalis), ces agressions peuvent exceptionnellement être de nature biologique. Dans ce qui suit, il sera essentiellement question du risque de corrosion des barres d'armature, car c'est le mécanisme qui provoque le plus de dégâts dans les structures en béton armé. Et à cet égard, il peut paraître paradoxal de préconiser la mise en place d'une quantité minimale d'armature, sachant que c'est l'armature elle-même qui est le point faible de la structure sur le plan de la durabilité!

Rappelons brièvement que la corrosion des barres d'armature résulte d'un mécanisme électrochimique qui présuppose les trois conditions suivantes:

- la couche passive de l'armature doit être rompue (appelé «dépassement», ce phénomène résulte de la baisse, sous l'effet de la carbonatation ou des ions chlorés, du pH du film fortement alcalin qui enrobe l'armature);

- un électrolyte (généralement de l'eau) doit être présent;
- l'oxygène doit atteindre l'armature.

Quant aux principaux paramètres régissant la vitesse de corrosion de barres d'armature, ce sont:

- l'intensité du mécanisme d'endommagement, principalement la pénétration des chlorures et l'amplitude de la carbonatation;
- la porosité du béton d'enrobage de l'armature;
- la quantité et les variations de l'humidité contenue dans le béton;
- la présence de fissures.

Comme discontinuités dans la structure, les fissures constituent des chemins d'accès préférentiels au cœur de l'élément, en particulier jusqu'à l'armature, pour les substances agressives (fig. 2). Du fait d'une perméabilité accrue, non seulement de la fissure mais encore des zones endommagées à l'interface acier-béton (longueur de transmission), le front de béton carbonaté ainsi que les chlorures parviennent rapidement jusqu'à l'armature.

Or les effets néfastes sur la durabilité, et plus particulièrement la question du danger de corrosion des armatures due à la présence de fissures, ne sont malheureusement pas clairement établis et font encore l'objet de controverses dans le monde scientifique. De nombreuses recherches et observations effectuées d'une part en laboratoire [1, 4, 12], d'autre part sur de nombreux anciens ponts en Suisse [6] ont montré que les problèmes de durabilité et en particulier le risque de corrosion des barres d'armature passive n'étaient pas influencés de manière significative par la valeur de l'ouverture des fissures, tant que celle-ci demeure comprise entre 0,05 mm et 0,5 mm - et ce, non seulement dans un environnement sec à l'intérieur des bâtiments, mais également pour des éléments d'ouvrage exposés aux intempéries ou à un environnement agressif (gel et sels de déverglaçage). En fait, le facteur prépondérant réside dans le caractère travers-

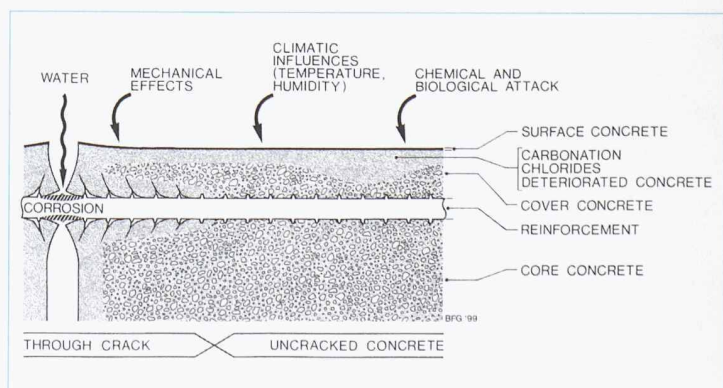


Fig. 3: Fissure à travers laquelle de l'eau ne peut pas s'écouler: apport d'oxygène à la cathode pendant l'amorçage de la corrosion (voir également fig. 4b), puis phase dormante suite à l'auto-colmatage de la zone endommagée et du fond de fissure par le produit de corrosion

Fig. 4: a) Béton non fissuré, modèle de Tuuti [13]: la corrosion se fait en deux phases distinctes, une phase d'incubation jusqu'à dépassivation de l'armature, et une phase de propagation; b) béton fissuré de façon non traversante, modèle de François [1]: la corrosion se fait en quatre phases, l'incubation, l'amorçage, la phase dormante et la propagation; c) béton fissuré de façon traversante et traversé par un débit d'eau qui peut circuler entre les lèvres de la fissure de manière occasionnelle.

Tableau I: Facteurs dont dépend l'auto-colmatage des fissures

sant ou non de la fissuration: cette faible influence de l'ouverture des fissures n'est en effet strictement vraie, que si ces dernières ne permettent pas l'écoulement d'eau [6]. Voyons rapidement ce qui distingue les deux types de fissuration.

2.2 Fissuration non traversante

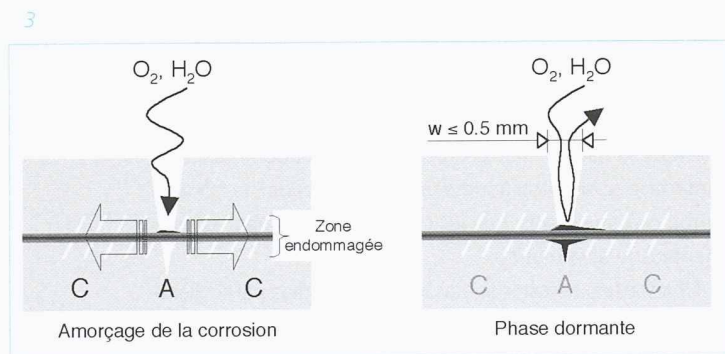
Par définition, un liquide ne peut s'écouler à travers une fissure non-traversante. Pendant l'amorçage de la corrosion (voir fig. 3 et 4b), se déclenche dès lors un processus d'auto-colmatage de la zone corrodée, par des salissures ainsi que par le produit corrosif, de volume supérieur au volume de

(C) par les zones les plus poreuses que sont l'interface de l'acier et du béton endommagé suite à la fissuration (fig. 3).

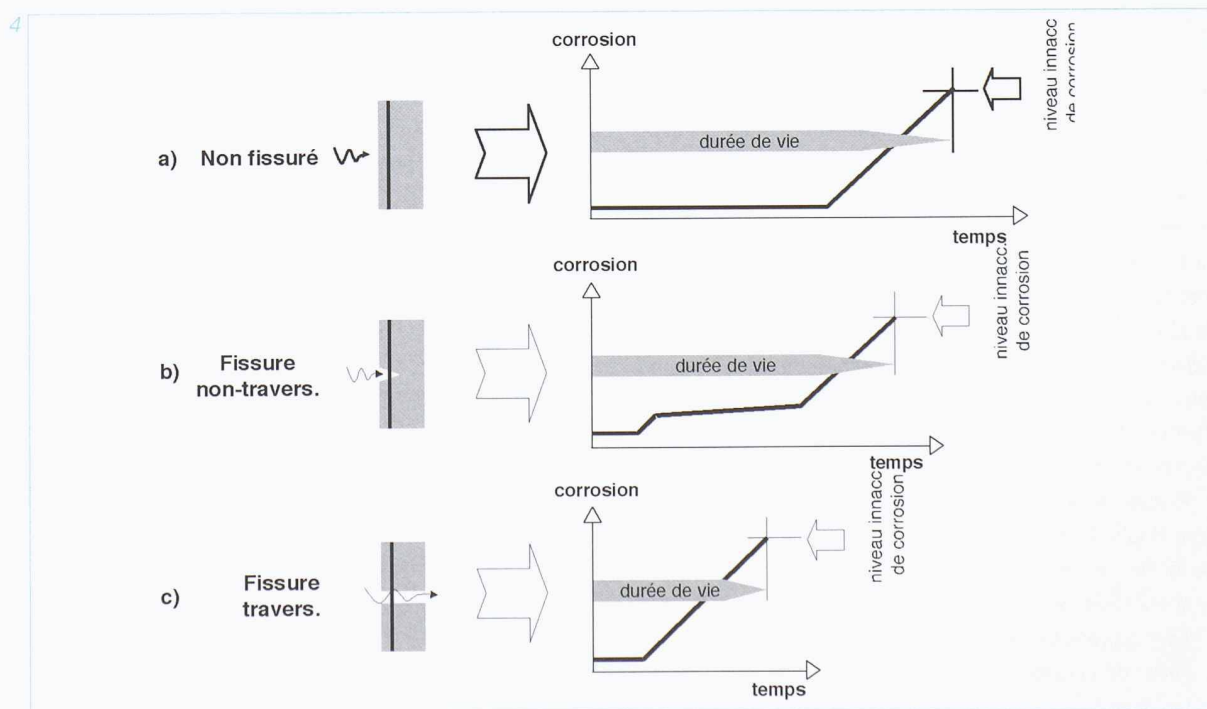
En outre, le fond des fissures non-traversantes est souvent saturé en eau et cette humidité provoque une migration des ions OH^- jusqu'aux abords de la surface extérieure de la fissure, ce qui contribue à remonter le pH, soit à repassiver l'endroit attaqué et à stabiliser la corrosion [8]. Autrement dit, suite à l'amorçage de la corrosion, l'auto-colmatage et la repassivation de la zone attaquée font que l'élément se comporte comme s'il n'était pas fissuré: c'est la phase dormante, dont la durée dépend du temps qu'il faudra aux chlorures et à la carbonatation pour pénétrer à travers la structure plus ou moins dense du béton d'enrobage (fig. 4b). Sous réserve que l'auto-colmatage du fond de fissure et la repassivation de l'armature soient possibles (ce qui est généralement le cas pour des ouvertures de fissures inférieures à 0,5 mm), le temps qui s'écoule jusqu'à ce qu'un niveau inacceptable de corrosion soit atteint ne diffère donc guère entre une pièce non-fissurée et une autre fissurée de façon non traversante.

2.3 Fissuration traversante

A l'inverse, une fissure traversante permet à l'eau de s'écouler périodiquement avec un certain débit au travers de l'élément fissuré. Etudiant l'étanchéité au gaz et à l'eau sur de grands tirants en béton armé, fissurés de façon traversante, Mivelaz [9] a observé que le liquide à la sortie de la



base [1, 8]. Or non seulement cet auto-colmatage freine grandement la pénétration d'agents agressifs, mais empêche dans une certaine mesure l'apport en oxygène à la cathode



Fissures	Eau	Matériau béton
Ouverture	Pression / gradient hydraulique	Granulats
Variation de l'ouverture	Dureté / matériaux transportés	Ciment
Longueur	Valeur du pH	Eau (ou rapport E/C)
Ramifications	Température	Porosité
		Âge

fissure était chargé de particules solides et légèrement teinté de rouille. Les particules de rouille sont évacuées par l'eau, ce qui exclut l'auto-colmatage par le produit corrosif, tout comme la repassivation des barres d'armature qui nécessite la présence d'eau stagnante. L'existence de fissures traversantes permettant le passage périodique d'un débit d'eau élimine donc la phase dormante, si bien que le comportement de l'élément affecté diffère fortement de celui d'un élément fissuré de façon non-traversante (fig. 4b et c).

Cela a été confirmé par une vaste campagne de mesures et d'observations *in situ* sur les tabliers d'anciens ponts en béton armé en Suisse [6]: indépendamment de l'infiltration d'eau et d'agents agressifs, l'intensité de la corrosion des barres d'armature passive dépend avant tout de la présence de fissures de type traversant.

2.3.1 Influence du nombre ou de l'espacement des fissures

L'espacement des fissures influence également le processus de corrosion des barres d'armature. En réduisant l'espacement des fissures, la dimension de la zone saine entre les fissures, qui joue le rôle de cathode, diminue. La dimension de la cathode dictant la vitesse de corrosion, celle-ci sera d'autant plus faible que l'espace entre fissures est minime. D'un autre côté toutefois, il ne faut pas trop diminuer le diamètre des barres dans le but de réduire l'espacement des fissures [12], car cette diminution augmente d'autant la vulnérabilité des barres à la corrosion (surface spécifique plus importante). Le gain induit, sur le front de la corrosion, par la réduction de l'espacement des fissures s'avère en effet plus faible que l'augmentation de la perte de section due à la diminution du diamètre des barres. Ajoutons qu'en multipliant les possibilités d'agression de l'armature, un grand nombre de fissures se révèle aussi grandement préjudiciable à la pérennité de la structure.

2.3.2 Étanchéité, auto-colmatage

Outre son influence sur la durabilité, l'étanchéité intervient très fréquemment parmi les fonctions que doit remplir un ouvrage en béton. Il convient de réaliser que la notion même d'étanchéité est toute relative et qu'elle peut dépendre dans une large mesure du type d'ouvrage, de ses conditions d'exploitation et des attentes du client. Une étanchéité absolue n'est pratiquement jamais atteinte et les exigences en la matière sont au fond toujours associées (sous une forme plus ou moins explicite) à des perméabilités ou à des débits d'infiltration admissibles. Ces exigences ne sont évidemment pas les mêmes selon qu'il s'agit d'un réservoir d'eau, d'un tun-

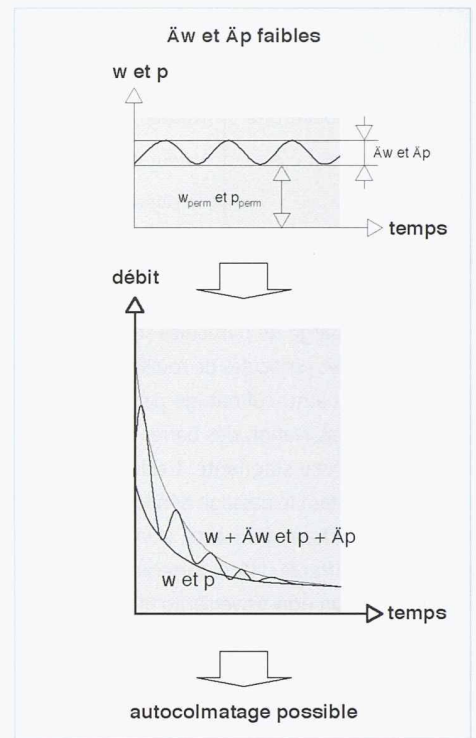
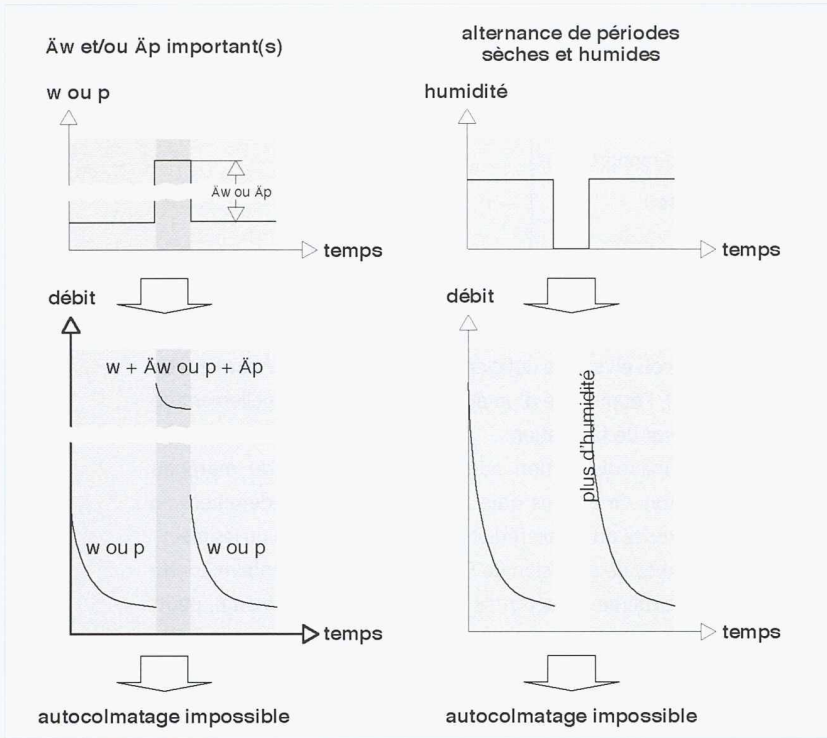
nel, d'une dalle de parking ou d'un tablier de pont. En l'absence ou en cas de déficience d'un revêtement étanche (voir 2.4.1), l'étanchéité d'un élément dépend essentiellement de son état de fissuration.

- La microfissuration augmente la porosité du matériau béton. Or comme nous l'avons exposé précédemment, la porosité du béton réduit sa durabilité et amplifie les mécanismes de corrosion de l'armature. Il est cependant connu que même un béton de faible qualité, microfissuré, peut être considéré comme étanche d'un point de vue fonctionnel; c'est le cas lorsque le débit d'infiltration d'eau est inférieur ou égal à la quantité d'eau susceptible de s'évaporer lorsqu'elle arrive à la surface.

- Les macrofissures traversantes sont des chemins n'offrant aucune résistance à la pénétration d'eau chargée en agents agressifs susceptibles de rompre la passivation de l'armature et d'amorcer le processus de corrosion. D'un point de vue fonctionnel, un élément ne peut plus être considéré comme étanche dès que les fissures sont d'ouverture supérieure à 0,05 mm en phase de localisation (branche descendante de la courbe du «softening» du béton) [3, 8, 9]. Si, avec le temps, l'auto-colmatage des fissures traversantes amène une réduction du débit, il ne faut cependant pas en attendre un miracle qui ferait retrouver au béton son intégrité et son étanchéité d'avant fissuration.

L'auto-colmatage des fissures résulte de la combinaison des nombreux effets suivants: le gonflement du béton en présence d'eau; l'accumulation, au niveau des goulets de la fissure, de particules de béton détachées au moment de l'apparition de celle-ci; le remplissage des fissures par des matières fines entraînées par l'eau (limon, argile, sels minéraux dissous, mousse); l'hydratation ultérieure des grains de ciment n'ayant pas réagi lors de la prise; la transformation des hydroxydes de Ca du béton en CaCO_3 . L'humidité dans laquelle se trouve l'ouvrage, l'ouverture des fissures traversantes (valeur et variations possibles) et la pression de l'eau (usuellement exprimée en termes de hauteur de colonne d'eau) sont des paramètres déterminants pour que le processus d'auto-colmatage ait lieu (tableau I).

L'étude des facteurs favorisant l'auto-colmatage des fissures a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années [4, 8, 9, 11]. S'il en résulte des avis parfois contradictoires, il est unanimement reconnu que le processus suppose la présence permanente d'eau ou d'humidité, ainsi qu'une pression pas trop élevée et surtout relativement stable. De plus, les fissures doivent être d'ouverture (w_{perm}) inférieure à $0,1 \div 0,2$ mm, et leur variation faible ($\Delta w < 0,5 w_{perm}$) (fig. 5 et 6). Ainsi, les chances d'auto-colmatage des



fissures traversantes dans un tablier de pont en béton précontraint sont nulles (variations Δw et alternances de périodes sèches/humides trop importantes), alors qu'elles existent réellement dans des structures du type tunnels immergés ou tranchées enterrées (voir tableau II). Cela étant, le nombre très élevé de paramètres intervenant dans le processus commande la plus grande prudence quant aux réelles chances d'auto-colmatage lors de la conception d'un ouvrage immergé ou enterré. Dans des situations quasi-similaires, parfois s'agissant du même ouvrage, il a en effet été montré que des fissures de 0,2 mm s'autocolmataient, alors que des fissures de 0,1 mm n'étaient aucunement touchées par le phénomène!

L'auto-colmatage demeurant fortement hypothétique, il s'agit dès lors de restreindre le débit d'infiltration en limitant au maximum les ouvertures des fissures. Rappelons que le débit varie avec le cube de l'ouverture de la fissure (fig. 7 et [9]). Pour fixer les idées, si à l'aide de précontrainte, on par-

vient à réduire de moitié l'ouverture d'une fissure, les quantités d'eau la traversant seront diminuées d'un facteur $2^3 = 8$. Cet affaiblissement du débit s'accompagne d'une réduction du pouvoir «nettoyant» de l'eau passant dans la fissure et d'une diminution des quantités de matières agressives qu'elle transporte, ce qui contribue à augmenter sensiblement la durabilité de la structure (voir figure 9).

2.4 Solutions de rechange pour assurer l'étanchéité

2.4.1 Revêtements et traitements de surface

Lorsque les exigences en matière d'étanchéité sont élevées, il est possible de prévoir un revêtement extérieur au béton. Les problèmes de l'étanchéité de la reprise des sollicitations mécaniques sur l'ouvrage s'en trouvent découplés. Les fissures traversantes peuvent alors être tolérées et, selon l'aptitude du revêtement d'étanchéité à ponter les fissures, leurs ouvertures doivent être plus ou moins contrôlées. De manière simplifiée, trois types de solutions peuvent être appliquées [3, 8]:

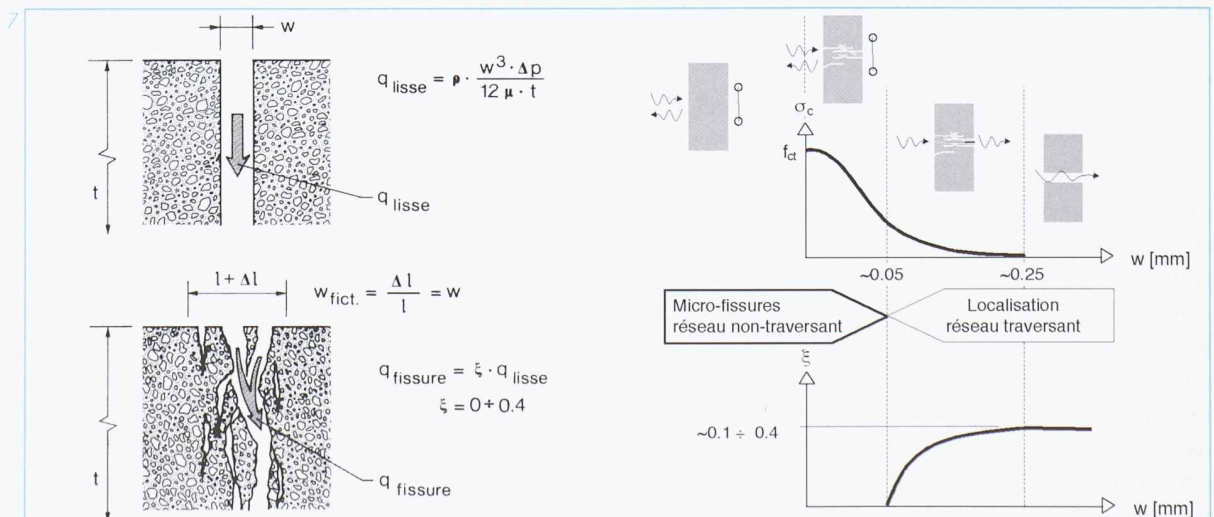


Fig. 5: Auto-colmatage des fissures traversantes impossible en cas de fortes variations d'ouverture des fissures et/ou de fortes variations de pression, de même qu'avec une alternance de périodes sèches et humides

Fig. 6: Auto-colmatage des fissures traversantes possible en cas de faibles variations d'ouverture de fissure et de pression

Fig. 7: Débit au travers d'une macro-fissure traversante et variation du coefficient de débit avec l'ouverture fictive de fissure [8, 9]

Tableau II: Les conditions suivantes sont-elles remplies afin d'espérer un auto-colmatage des fissures traversantes en fonction du type d'ouvrage et des actions qui s'y appliquent?

		Réservoir	Structure immergée ou enterrée	Tablier de pont
Conditions d'auto-colmatage	Faibles variations de Δp	NON	✓	✓
	Faibles variations de Δw	✓	✓	NON
	Humidité quasi-continue	✓	✓	NON

- les revêtements d'étanchéité préfabriqués sous forme de membranes adhérentes à base de bitume, de hauts polymères ou constitués de tôles à plus ou moins forte capacité de pontage;
- les enduits d'imperméabilisation filmogènes, réalisés avec un mortier à liant hydraulique adjuvanté d'un hydrofuge de masse et/ou d'une résine de synthèse, ou exclusivement constitués de polymères de synthèse (résines époxy, acryliques ou de polyuréthane), éventuellement armés de fibres à haute élasticité; certains de ces enduits peuvent ponter des fissures de faible ouverture ($w \leq 0,3$ mm);
- les traitements d'imprégnation de surface, du type imprégnations hydrophobes non filmogènes (à base de composés silico-organiques) ou du type glacis filmogènes (résines époxy, méthacryliques), soit l'application de produits qui, pour la plupart, réagissent chimiquement avec la chaux libre du ciment pour former des cristaux insolubles, obstruant le réseau de pores capillaires du béton (dans le cas des glacis) ou neutralisant la capillarité (dans le cas d'imprégnations hydrophobes); ces traitements d'imprégnation ne tolèrent généralement que des fissures de très faible ouverture ($w \leq 0,05$ mm).

Le choix du revêtement approprié s'avère primordial, car il doit répondre aux exigences définies en matière d'étanchéité et de durabilité tout en étant compatible avec les sollicitations qui s'appliquent à la structure. De ce choix dépend la sévérité qu'il convient d'adopter en matière de limitation de l'ouverture des fissures. Relevons enfin que, quel que soit leur type, les revêtements multiplient les difficultés de réalisation d'un ouvrage (qu'il s'agisse de la préparation des surfaces, de la planification des travaux ou des détails de construction) ce qui accroît d'autant les risques de malfaçon. Quant à la durée de vie des revêtements - presque toujours inférieure à celle qu'on attend de la structure - elle oblige leur remplacement périodique.

2.4.2 Traitements des fissures

Le traitement des fissures à l'aide de produits *ad hoc* (résines époxy, polyuréthanes, polyméthacrylates) permet dans certains cas de rendre au béton son étanchéité, et parfois son monolithisme, de façon extrêmement efficace et élégante.

- Il existe deux grandes catégories de traitements [2]:
- les *traitements de surface*, qui permettent d'assurer ou de rétablir l'étanchéité de la surface d'une structure. On distingue trois techniques différentes qui sont le calfeutrement (produit déposé dans une engravure façonnée le long du tracé de la fissure, permettant de traiter des fissures d'ouverture $w = 0,2 \div 0,3$ mm), le pontage (application superficielle d'un film généralement armé et adhérent de part et d'autre de la fissure; $w = 0,3 \div 3$ mm) et l'imprégnation (voir ci-dessus, applicable uniquement au cas d'un réseau de microfissures; $w \leq 0,05$ mm);
 - les *traitements dans la masse*, qui visent à reconstituer le monolithisme de la structure en procédant à un remplissage complet de la fissure par injection

Le traitement des fissures fait appel à des produits à base de liants hydrauliques, de silicates ou de matières organiques (résines époxy, polyesters, silicones, etc.), dont le choix est fonction des objectifs visés et du milieu ambiant. L'efficacité réelle d'un traitement des fissures qui doit, dans la grande majorité des cas, être réalisé avant la mise en service de l'ouvrage, suppose évidemment que:

- les fissures proviennent d'effets liés à la réalisation de l'ouvrage;
- de nouvelles fissures ne puissent apparaître à la suite de sa mise en service (si, comme c'est souvent le cas, il n'est alors plus possible de traiter les fissures - autant que faire se peut, la structure doit donc demeurer exempte de sollicitations fortement variables et le retrait de dessiccation entravé doit être aussi faible que possible.

Si des structures enterrées ou immergées remplissent idéalement ces conditions, ce n'est malheureusement pas vrai pour les tabliers de ponts, qui sont sujets à des sollicitations fortement variables à même d'engendrer une fissuration lors de l'utilisation. Ajoutons que ces procédés nécessitent une excellente compréhension des phénomènes conduisant à la fissuration du béton: types de fissures, origines des fissures et mécanismes de formation. De plus, pour être pleinement efficace, le traitement des fissures doit être prévu dès la genèse du projet. Il nécessite une conception de l'ouvrage sans faille, une grande attention aux choix du type de béton et des méthodes de réalisation, ainsi que l'utilisation d'un outil

Fig. 8: En milieu agressif et en présence de fissures préjudiciables à l'étanchéité et la durabilité d'un élément, s'agit-il de limiter les ouvertures des fissures et/ou leur nombre?

Fig. 9: Accumulation d'eau dans le caisson et risques de corrosion des barres d'armature de la dalle inférieure et des âmes en cas de fissures traversantes permettant le passage d'eau à travers la dalle supérieure

Tableau III: Recommandations de l'IBAP [Laurentet et Jacoud, 2000] concernant les exigences en matière d'ouverture maximale admissible des fissures

d'analyse à même d'aborder de façon aussi exacte que possible les multiples facettes relatives à la fissuration d'un ouvrage en béton.

Pour que le traitement demeure économique, il s'agit de limiter au maximum le nombre de fissures: c'est en effet souvent le nombre de mètres linéaires de fissures à injecter qui régit l'économie du procédé, et non leur ouverture. Dans le cas de l'injection, cette ouverture doit en outre être suffisamment grande; la mise en œuvre d'une armature minimale trop importante, afin de favoriser l'apparition d'un grand nombre de fissures de faible ouverture, est dès lors à proscrire car elle va à l'encontre de ce procédé. On optera pour une armature minimale pas trop élevée, dimensionnée de manière à éviter l'écoulement des aciers d'armature. Il sera en outre judicieux d'opter pour une répartition pas trop fine de l'armature (barres de grand diamètre, espacées de 200 à 300 mm).

Dans bien des cas, le traitement des fissures remplace avantageusement la mise en œuvre d'une étanchéité à fonction non porteuse lors de la réalisation d'ouvrages enterrés. Il est à cet égard significatif que des pays à la pointe dans ce domaine (Pays-Bas, Danemark, Grande-Bretagne [3]) réalisent de plus en plus de tranchées couvertes ou de tunnels immergés sans couche d'étanchéité spécifique, moyennant - entre autres mesures - le traitement des fissures traversantes naissant au jeune âge². Le projet s'avère ainsi fréquemment plus économique, car il évite la mise en œuvre d'une étanchéité extérieure et d'une armature minimale importante au moment de la construction et, surtout, il engendre moins de frais de maintenance durant l'exploitation de l'ouvrage.

3. Proposition d'une stratégie pour mieux satisfaire les exigences requises

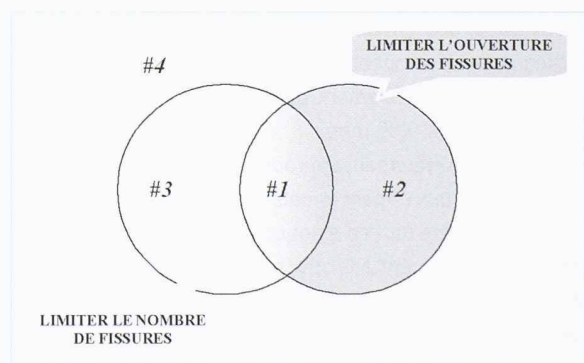
Pour commencer, il convient de rappeler que l'approche préconisée dans les normes et codes actuels se préoccupe principalement de la limitation de l'ouverture des fissures et recommande à cet effet la mise en œuvre d'une armature passive minimale relativement importante, ainsi que le choix d'une répartition aussi fine que possible de celle-ci. Or des recherches récentes en la matière montrent que si la mise en œuvre d'armature minimale est pleinement justifiée dans un grand nombre de cas, elle peut parfois se révéler insuffisante pour la bonne tenue dans le temps et le fonctionnement adéquat de la structure, voire même s'avérer néfaste dans

² Pour un rapide tour d'horizon des principes appliqués à ce genre de réalisations, illustré par la description d'ouvrages bâtis dans ces trois pays ainsi qu'en Norvège, voir aussi HAZEM CHARIF et JÉRÔME PONTI: «Réalisation de tranchées couvertes - Tendances internationales», dans IAS N° 26/1998, pp. 466-71

certains cas. Ainsi, le recours à de trop faibles diamètres (répartition fine de l'armature) n'est pas recommandé face au risque de corrosion des barres [12]. Un espacement trop faible des barres d'armature n'est pas davantage approprié pour permettre la mise en œuvre du béton et assurer l'obtention des qualités que l'on en attend.

L'armature minimale nécessaire selon les normes peut être graduée en fonction du niveau d'exigences requises, à savoir de la valeur maximale tolérée pour l'ouverture des fissures. En général, elle doit être supérieure à celle résultant de conditions de non-écoulement des aciers d'armature, sauf là où la fissuration est contrôlée par des conditions géométriques indépendamment de l'armature mise en œuvre [8]. C'est en particulier le cas lorsque l'espacement des fissures est dicté par le faible éloignement d'une zone comprimée.

Rappelons néanmoins qu'en l'état actuel, les clauses et règlements permettent de nuancer sensiblement les quantités d'armature minimale à mettre en œuvre. Ainsi, dans de nombreux cas, il est possible (mais toujours impératif) de satisfaire les seules conditions de non plastification des aciers d'armature, afin d'éviter l'apparition de fissures isolées d'ouverture non contrôlée. Lorsque les exigences relatives à la fissuration sont plus sévères, une armature minimale en quan-



tité supérieure sera disposée dans l'élément. Les codes permettent de nuancer cette quantité d'armature en fonction d'une ouverture de fissure maximale souhaitée. Lorsque le milieu ambiant fait craindre des problèmes de corrosion, il faudra impérativement choisir des diamètres de barres pas trop faibles, c'est-à-dire ne pas chercher à répartir trop finement l'armature minimale.

De façon conceptuelle, nous proposons l'ébauche de stratégie suivante afin de permettre au concepteur de juger du bien-fondé et de la nécessité de limiter la fissuration, ainsi que des quantités d'armature minimale à mettre en œuvre.

Motif ou objectif	Exigences: w_{lim} ou w_k (ou autre critère)
Ductilité suffisante (*)	Non écoulement de l'armature ($\approx w_{max} \geq 0,5 \div 1$ mm, selon type d'acier)
Apparence, aspect des parements (en l'absence d'eau traversant les fissures)	0,2 \div 0,3 mm
Durabilité	
En l'absence de fissures traversantes	
Béton armé	0,3 \div 0,5 mm
Béton précontraint	0,2 mm (\approx état de décompression)
En présence de fissures traversantes avec possibilités d'infiltrations d'eau	
Béton armé et précontraint	0,05 \div 0,2 mm (**) ou réserve de compression $ \Delta_{perm} \geq 1 \div 2$ MPa
Étanchéité (locale ou relative)	0,05 \div 0,2 mm
Étanchéité absolue ou autres motifs	Zéro
(*) sous conditions extrêmes de service ou à l'approche de la ruine (**) fonction de la possibilité d'auto-colmatage des fissures (voir 2.3.2)	

1) En fonction du projet étudié, il s'agit, au sujet de la fissuration, de se demander si la présence de fissures est préjudiciable ou non à l'un des critères évoqués dans notre introduction.

2) Si l'apparition des fissures (traversantes ou non) est considérée comme préjudiciable, il convient alors de se demander s'il faut limiter l'ouverture et la densité ou le nombre des fissures.

La réponse à ces questions, dépend de plusieurs paramètres (type d'ouvrage, exposition de la partie de l'ouvrage considérée, souhaits du maître d'œuvre, etc.), ainsi que de certains choix de l'auteur du projet, tels que de traiter les fissures ou de recourir à une étanchéité extérieure à plus ou moins forte capacité de pontage.

Or s'il est relativement aisé de se placer dans l'une ou l'autre des catégories de la figure 8, il est nettement plus délicat de se prononcer, de cas en cas, sur:

- les catégories #1 et #3, soit le nombre ou l'espacement des fissures admissibles (par ex. structure immergée ou enterrée);
- les catégories #1 et #2, soit l'ouverture admissible des fissures (par ex. tablier de pont).

Lorsque c'est le critère de limitation de l'ouverture des fissures qui est jugé déterminant, nous proposons au tableau III, de façon générale et indicative, des ordres de grandeur de valeurs maximales d'ouverture des fissures en fonction des objectifs visés, tandis que quelques cas particuliers sont développés ci-dessous.

3.1 Tablier de pont en caisson

Dans le cas spécifique de la dalle supérieure d'un tablier de pont, en raison de la faible durabilité de l'étanchéité qui y est généralement disposée et des défauts inhérents à sa mise en place, on aura tout intérêt à réduire l'ouverture des fissures de telle manière à limiter les risques d'infiltration ou de débit d'eau à travers la dalle en cas de défauts de l'étanchéité.

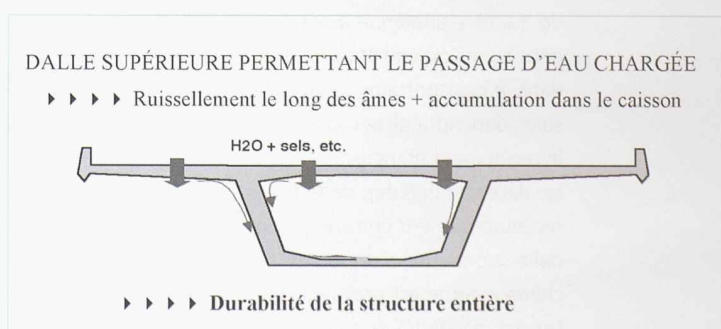
On contribue ainsi à améliorer la durabilité de la dalle supérieure, en réduisant de surcroît les infiltrations d'eau dans le caisson. En effet, l'eau qui s'infiltré va ruisseler le long des

âmes, s'accumuler sur la dalle inférieure de l'ouvrage et engendrer des altérations de la structure (fig. 9). Il s'agira donc de limiter les ouvertures des fissures et, dans une moindre mesure, la densité de fissuration (fig. 8, #2 ou, éventuellement, #1). De façon indicative, nous proposons dans ce cas précis de mettre en œuvre une armature minimale et une précontrainte suffisantes afin de garantir, sous charges permanentes, une ouverture de fissures de l'ordre de 0,05 mm [7, 8]. De la sorte, les débits d'infiltration à travers la dalle supérieure demeureront suffisamment faibles pour que l'on puisse considérer que l'eau traversant la dalle s'évapore après avoir traversé les parois du béton et atteint la surface.

Dans le cas de la dalle inférieure d'un tablier de pont en caisson, on se placera également dans la catégorie #2 de la figure 8. Cependant, du fait de son exposition plus favorable que celle de la dalle supérieure, une limitation moins sévère de l'ouverture des fissures à 0,2 voire 0,3 mm, est suffisante. Il en résultera une armature minimale généralement moins importante que dans la dalle supérieure.

3.2 Structure enterrée ou immergée (sans revêtement étanche)

Dans la majeure partie des cas, la présence de fissures traversantes dans des ouvrages du type tunnel ou tranchée provient d'effets liés à la réalisation de l'ouvrage. On prendra dès lors soin d'adopter des mesures permettant de réduire ces risques [3, 5, 8]. Cela suppose que des mesures précises soient prises lors de la réalisation même de l'ouvrage - à savoir le choix d'une recette de béton appropriée, faiblement



exothermique, néanmoins à même de garantir les exigences définies en matière de résistance mécanique et de durabilité -, le choix des étapes de bétonnage et de la mise en œuvre d'éventuelles brèches de clavage, l'application de mesures telles que le refroidissement du béton faisant prise ou le réchauffement simultané du béton entravant, ainsi que des mesures de cure appropriées, etc.

La réalisation d'un ouvrage enterré est propice au *traitement des fissures*. Si l'on opte pour cette solution, il y aura lieu de limiter le nombre de fissures tout en garantissant une certaine ouverture de celles-ci (fig. 8, #3) au-dessous de laquelle le traitement n'est plus possible, ou, du moins, rendu difficile. L'armature minimale n'y sera pas trop finement répartie et garantira le non-écoulement des aciers d'armature.

Si, lors de la réalisation d'un ouvrage de ce type, on est persuadé de pouvoir compter sur l'auto-colmatage des fissures (solution, rappelons-le, à considérer avec toute la prudence voulue, en raison du caractère fortement hypothétique qui caractérise le phénomène), il faudra limiter l'ouverture ($w \leq 0,1 \div 0,2$ mm) ainsi que la densité des fissures (fig. 8, #1 ou, éventuellement, #2). Outre les mesures à prendre lors de la réalisation de l'ouvrage, la mise en œuvre d'une importante armature minimale est dans ce cas indispensable.

3.3 Étanchéité extérieure

Lorsqu'on opte pour la mise en œuvre d'une étanchéité extérieure à forte durabilité (ou aisément remplaçable), on se trouvera dans la figure 8 en #2 si cette dernière présente une faible capacité de pontage, et en #4 si, au contraire, elle a une forte capacité de pontage (voir les indications données sous 2.4.1). Dans le premier cas, la mise en place d'une armature minimale importante s'avère indispensable, dans le second, une armature garantissant le respect du non-écoulement des aciers sous sollicitations de service est suffisante.

3.4 Bâtiment

Dans un bâtiment, il convient à notre sens de distinguer:

- les murs contre terre et les radiers, qui peuvent être traités de manière analogue aux structures enterrées et immergées au cas où une étanchéité extérieure n'est pas prévue; dans le cas contraire, la limitation de l'ouverture des fissures dépendra de la capacité de pontage des fissures par le revêtement étanche;
- les dalles de parking, de toiture et de terrasses, en cas de raccourcissement entravé, peuvent être traitées comme la dalle supérieure d'un tablier de pont - lorsqu'une étanchéité externe est prévue, la limitation de l'ouverture des fissures dépendra de sa capacité de pontage;

- pour les autres éléments de structure internes et à l'abri des intempéries (dalles, murs), les exigences en matière de fissuration pourront être fortement réduites, sous réserve que cela soit acceptable du point de vue esthétique.

Conclusions

La durabilité d'un ouvrage en béton est largement tributaire de son comportement structural et du risque de fissuration qui en résulte. S'il est fissuré, sa durabilité ne peut guère être assurée par la seule réalisation d'un béton compact, étanche et résistant au gel entre les fissures! L'obtention d'un ouvrage offrant des performances d'aptitude au service et de durabilité suffisantes, c'est à dire conformes aux attentes des clients et aux exigences définies par les normes, implique la mise en œuvre de mesures supplémentaires au niveau de la conception, du dimensionnement et des détails de construction [5, 10]. Il s'agit en outre de prendre toutes les précautions susceptibles de diminuer le plus possible, voire d'empêcher totalement, l'apparition de fissures dans les ouvrages, en particulier lors de leur réalisation [3].

Néanmoins, il est souvent très difficile d'exclure tout risque d'apparition de fissures dans un ouvrage en béton. Lorsque cette apparition est probable, sinon certaine, deux stratégies sont possibles pour se prémunir contre leurs conséquences négatives pour la durabilité de l'ouvrage [8]:

- limiter la fissuration (ouverture des fissures et densité de fissuration) à des valeurs telles qu'elles ne soient plus préjudiciables à l'esthétique, propices à la corrosion des aciers d'armature et/ou dommageables pour l'étanchéité (voir tableau III);
- empêcher la pénétration d'eau et de gaz agressifs au travers des fissures en rendant la structure étanche, soit au moyen d'une membrane d'étanchéité soit en traitant ultérieurement chaque fissure (injection par ex.).

La corrélation entre la fissuration et la durabilité des structures en béton constitue un vaste thème de recherche dont les résultats provisoires ne font pas encore l'unanimité. Une synthèse récente de la question peut être trouvée dans la référence [8].

Quoi qu'il en soit, nous sommes d'avis que pour les ouvrages de génie civil exposés aux intempéries ou en contact avec le sol et l'eau, l'étanchéité constitue une condition corollaire importante sinon indispensable à garantir la durabilité. L'eau ou les gaz s'infiltrant au travers des fissures peuvent en effet être chargés de substances favorisant la corrosion de l'armature et préjudiciable à la durabilité de l'ouvrage. En cas de défektivité d'une membrane d'étanchéité, ou en son absence, des fissures traversantes permettront des infiltra-

tions d'eau, qui seront stoppées ou non par un processus d'auto-colmatage, ce phénomène étant tributaire d'une humidité permanente du béton et d'une ouverture des fissures ne variant pas trop au cours du temps.

Des fissures isolées d'ouverture inférieure ou égale à 0,3 mm, voire jusqu'à 0,5 mm, peuvent être tolérées dans des ouvrages en béton armé en ce qui concerne la durabilité, à condition toutefois qu'il s'agisse de fissures non traversantes ou, dans le cas contraire, en l'absence d'infiltration d'eau. A l'issue d'essais en laboratoire et lors de l'auscultation de ponts routiers en Suisse (voir chapitre 2), il a en effet été constaté que la grandeur de l'ouverture des fissures n'influence pas de manière significative l'intensité et la vitesse de corrosion des barres d'armature dans de telles conditions, tant qu'elle n'exède pas les valeurs limites indiquées ci-dessus.

Ces ouvertures limites des fissures (0,05 ÷ 0,2 mm, respectivement 0,3 ÷ 0,5 mm) sont également valables pour la durabilité d'autres ouvrages de génie civil en béton armé, tels que les murs de soutènement, les tranchées couvertes ou les tunnels.

Références bibliographiques

- [1] ARLIGUIE G., FRANÇOIS R., OLLIVIER J.-P.: «Prédiction de la pénétration des chlorures dans les structures en béton armé», *Revue Française du Génie Civil*, vol. 1 n°3, 483-502, Paris, 1997
- [2] CALGARO J.-A., LACROIX R.: «Maintenance et réparation des ponts», Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 666 pp., Paris, 1997
- [3] CHARIF H., MIVELAZ P.: «Synthèse sur la problématique et la conception des tranchées couvertes et autres ouvrages enterrés en béton», rapport d'étude pour l'OFROU 497.003.1 - 1, ESM - Sarrasin Ingénieurs SA, Saint-Sulpice, 1998
- [4] EDVARDSEN C.: «Wasserdurchlässigkeit und Selbstheilung von Trennrissen in Beton», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 455, Berlin, 1996
- [5] FAVRE R., JACCOUD J.-P., BURDET O., CHARIF H.: «Dimensionnement des structures en béton - Aptitude au service et éléments de struc-

tures», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Traité de Génie Civil de l'EPFL, vol. 8, 586 pp., Lausanne, nouvelle édition, 1997

- [6] KELLER T.: «Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken - Transportmechanismen und Auswirkung von Rissen», Bericht IBK-ETH Zürich, n°184, éd. Birkhäuser Bâle, 1991
- [7] LAURENCET P., ROTILIO J.-D., JACCOUD J.-P., FAVRE R.: «Influence des actions variables sur l'état permanent des ponts en béton précontraint», mandat de recherche n°88/94, rapport VSS n°537, 168 pp., Zurich, 1999
- [8] LAURENCET P.: «Précontrainte et armature pour contrôler l'ouverture résiduelle des fissures», thèse de doctorat n°2028, EPFL-IBAP, Lausanne, 1999
- [9] MIVELAZ P.: «Étanchéité des structures en béton armé - Fuites au travers d'un élément fissuré» thèse de doctorat n°1539, EPFL-IBAP, Lausanne, 1996
- [10] MEHTA K.: «Concrete technology for sustained development», *Concrete International*, ACI, 21 n°11, 47 - 53, Detroit, 1999
- [11] NEVILLE A.: «Chloride attack of reinforced concrete: an overview», *Materials and Structures*, 28, 63-70, RILEM Publications, Paris, 1995
- [12] SCHIESSL P., RAUPACH M.: «Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete», *ACI Materials Journal*, 94-M1, 56-62, Detroit, 1997
- [13] TUUTI K.: «Corrosion of steel in concrete», Swedish Cement and Concrete Research Institute Ed., Stockholm, 1982

Normes, règlements et recommandations

- [14] CEB: «CEB Design guide: Durable concrete structures», Bulletin d'information n°183, Thomas Telford, London, 1992
- [15] CEB: «CEB Design guide: CEB-FIP Model code 1990», Bulletin d'information n°213-214, Thomas Telford, London, 1993
- [16] EUROCODE 2: «Calcul des structures en béton - Partie 1: Règles générales et règles pour le bâtiment», Prénorme européenne SIA V 162.001, Zurich, 1992
- [17] EUROCODE 2: «Calcul des structures en béton - Partie 2: Ponts en béton», Prénorme européenne SIA V 162.008, Zurich, 1997
- [18] EUROCODE 2: «Calcul des structures en béton - Partie 4: Structures de soutènement et réservoirs», CEN European committee for standardization, Version provisoire ENV 1992-4, Bruxelles, 1998
- [19] SIA 162: «Ouvrages en béton», Société suisse des ingénieurs et architectes, norme, vol. 162, révision partielle, Zurich, 1993
- [20] SIA 162/5: «Conservation des structures en béton», Société suisse des ingénieurs et architectes, recommandation, vol. 162/5, Zurich, 1997

PETIT CROQUIS DÉPLACÉ

