

# Maîtrise du retrait pour la réalisation d'ouvrages durables en béton (2)

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin du ciment**

Band (Jahr): **69 (2001)**

Heft 5

PDF erstellt am: **16.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-146560>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Maîtrise du retrait pour la réalisation d'ouvrages durables en béton (2)

Pour limiter le retrait et ses conséquences néfastes, à savoir la fissuration, des mesures de construction et de technologie du béton sont à disposition.

Les fissures peuvent avoir une grande influence sur la durabilité et l'aptitude au service d'un ouvrage en béton armé. Il en est traité dans ce qui suit. Il est traité ensuite de façon approfondie de la réduction à un minimum de la fissuration lors du retrait des bétons, puis des expériences faites avec le système bonus/malus – basé en partie sur la grandeur du retrait des bétons – ainsi que de généralités concernant la durabilité des ouvrages.

## Fissures et durabilité [2, 8]

Dans un ouvrage en béton, les fissures se forment à différents moments. Une sélection des diverses formes de fissures est présentée à la *figure 3*. Les fissures de retrait sont mises en évidence en rouge.

En dehors des macrofissures visibles, des microfissures se trouvent à l'intérieur du béton. Elles permettent de

mesurer le degré de dégradation d'un ouvrage.

Les fissures facilitent la pénétration d'eau et de substances qui y sont dissoutes, telles que sels de déverglaçage ou sulfates. Selon les conditions d'environnement, les mécanismes de transport peuvent être les suivants:

- absorption capillaire
- différences de pression de vapeur d'eau
- différences de pression absolue (réservoirs).

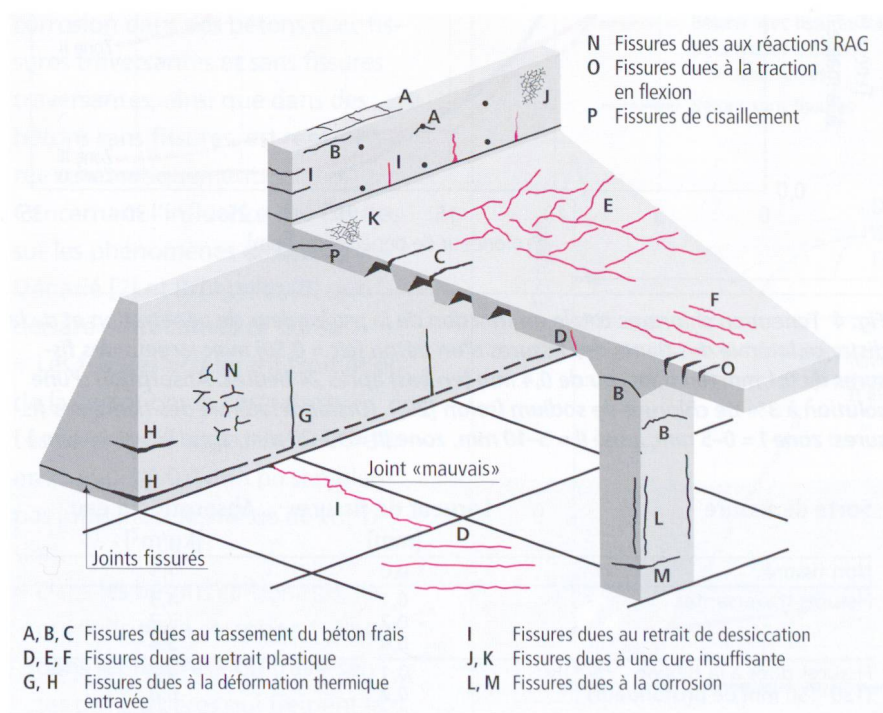


Fig. 3 Les fissures de retrait ne sont qu'une des sortes de fissures qui peuvent se former dans les éléments d'ouvrage en béton en fonction de facteurs tels que la conception architecturale, la réalisation et les sollicitations (selon [19]). Dessins: TFB

## A propos de cet article

Cette deuxième partie de l'article sur le retrait des bétons est également basée en majeure partie sur des exposés présentés lors de deux séminaires du TFB:

- «Maîtrise du retrait pour la réalisation d'ouvrages durables en béton», le 16 novembre 2000 à Fribourg [1–6]
- «Mit möglichst geringem Schwinden zu dauerhaften Bauwerken?», le 12 février 2001 à Wildegg [7–11]

Les orateurs et leurs exposés ont été présentés dans la première partie de cet article, en page 4. Ont parlé:

- R. Leutwyler (Genève) [1]
- E. Dénarié (Lausanne) [2]
- J.-P. Jaccoud (Eclépens) [3, 5, 9]
- P. Mivelaz (St-Sulpice) [4]
- P. Graber (Lausanne) [6]
- W. Schuler (Ittigen) [7]
- E. Brühwiler (Lausanne) [8]
- F. Jacobs (Wildegg) [10]
- R. Suter (Soleure) [11 a]
- S. Brigger (Soleure) [11 b].

D'autres informations proviennent de la littérature spécialisée (voir Bibliographie en page 11).

Dans les *fissures traversantes*, moins elles sont larges, plus l'eau est transportée loin par l'absorption capillaire.

Pour les *fissures dues à la flexion*, l'influence de la largeur est nettement moindre que pour les fissures traversantes, et l'absorption d'eau augmente en revanche parallèlement à la largeur des fissures (tableau 2). En cas de transport sous pression, la règle est que plus la pression et la largeur des fissures sont grandes, plus le flux d'eau l'est aussi.

### Transport de chlorures dans les fissures traversantes

Les résultats d'essais d'absorption avec une solution de chlorure de sodium sur des bétons armés avec fissures de 0,1 ou 0,4 mm en fonction de la distance des flancs de la fissure sont enregistrés à la figure 4.

Comme l'on pouvait s'y attendre, la profondeur de pénétration est beaucoup plus élevée pour les bétons avec fissure de 0,1 mm que pour les bétons avec fissure de 0,4 mm (environ 105 mm contre bien 30 mm). La répartition rapide des ions de chlorure le long des flancs des fissures jusqu'à une distance d'environ 10 mm (zones I et II) est également frappante.

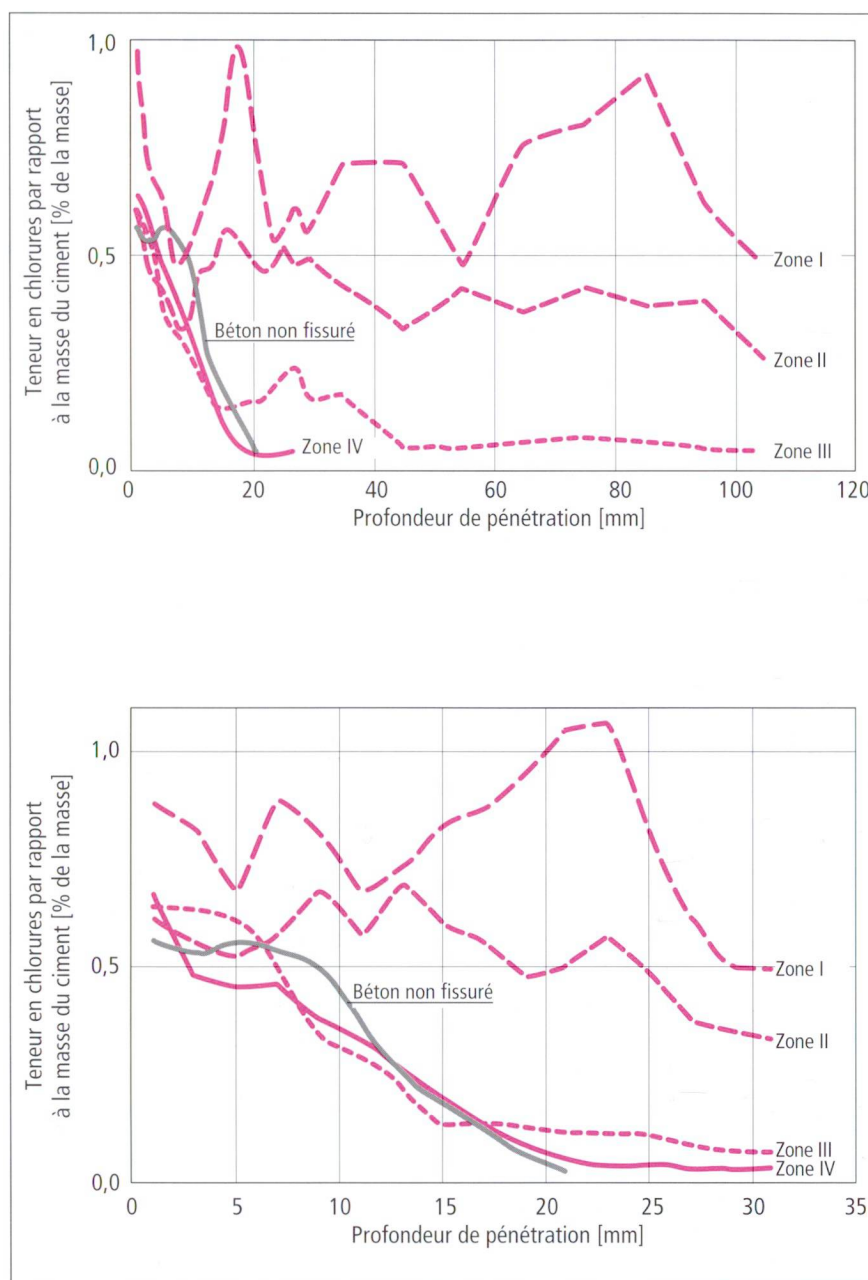


Fig. 4 Teneur en chlorures totale en fonction de la profondeur de pénétration et de la distance latérale des flancs des fissures d'un béton ( $e/c = 0,50$ ) avec largeur des fissures de 0,1 mm (en haut) ou de 0,4 mm (en bas) après 24 heures. Absorption d'une solution à 3% de chlorure de sodium (selon [20]). (Distance latérale des flancs des fissures: zone I = 0–5 mm, zone II = 5–10 mm, zone III = 10–20 mm, zone IV = > 20 mm.)

Sorte de fissure	Largeur de fissure [mm]	Absorption d'eau [kg/m <sup>2</sup> ]
Non fissuré	0,0	1,5
Fissures traversantes	0,1	4,3
	0,2	3,7
	0,4	3,4
Fissures dues à la flexion (130–150 mm de profondeur)	0,1	6,2
	0,2	6,4
	0,4	< 6,6
	0,8	> 6,6

Tab. 2 Absorption d'eau capillaire après 24 heures lors d'essais d'absorption avec des cubes de béton (longueur de côté 150 mm;  $e/c = 0,50$ ) selon [20].

### Corrosion dans des éléments d'ouvrage fissurés

Les aciers d'armature sont protégés contre la corrosion par une couche d'oxydes de fer. Avec des valeurs pH inférieures à 11,0–11,5 (c'est-à-dire dans un béton carbonaté) ou en présence de teneurs en chlorures élevées, cette couche n'est plus stable; lorsque de l'eau et de l'oxygène s'y ajoutent, il y a risque de corrosion.

A la figure 5, la progression de la corrosion dans des bétons avec fissures traversantes et sans fissures traversantes, ainsi que dans des bétons sans fissures, est représentée schématiquement.

Concernant l'influence des fissures sur les phénomènes de corrosion, Dénarié [2] et Brühwiler [8] ont déclaré entre autres ce qui suit:

- Les fissures accélèrent l'initiation de la corrosion de l'armature. Les fissures de largeur inférieure à environ 0,3 à 0,4 mm ne semblent pas influencer la vitesse de corrosion.

- Dans les bétons carbonatés, les produits de la corrosion forment dans les fissures non traversantes des barrières qui freinent la progression de la corrosion pendant ce qu'on appelle la «phase dormante». La durée de cette

phase dépend de la qualité du béton d'enrobage.

- En cas d'actions des chlorures, la qualité du béton d'enrobage ainsi que son degré de dégradation sont seuls à influencer la progression de la corrosion.

L'importance des fissures dans les éléments d'ouvrage en béton est souvent surestimée. L'étanchéité du béton d'enrobage est nettement plus importante.

### Mesures de construction [5, 9]

Pour limiter le retrait et ses conséquences néfastes, à savoir la fissuration, des mesures de construction sont également à disposition en plus des mesures de technologie du béton dont il a été traité dans la première partie de cet article:

- Projet de la structure porteuse, conception statique

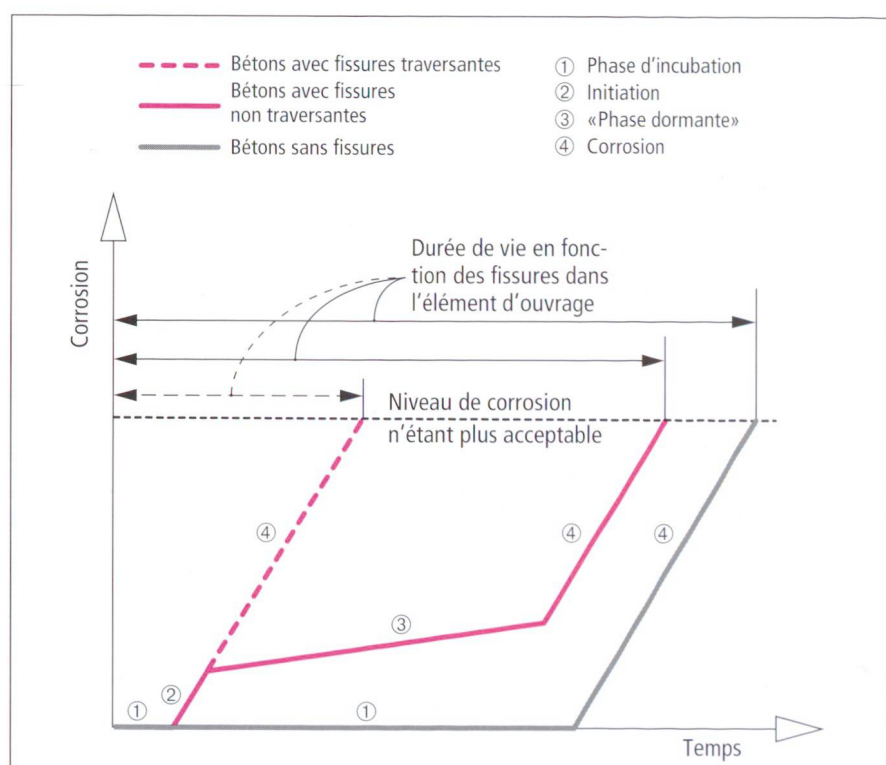


Fig. 5 Modèles de l'évolution de la corrosion en fonction du temps dans des bétons avec fissures traversantes, avec fissures non traversantes ainsi que sans fissures (selon [21, 22]).

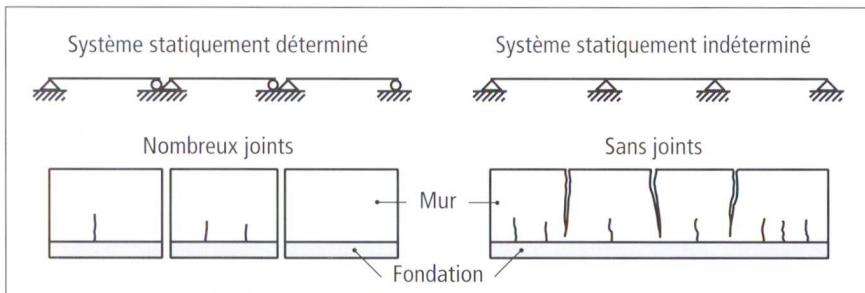


Fig. 6 Diminution du risque de fissuration grâce à des mesures de conception (selon [23]).

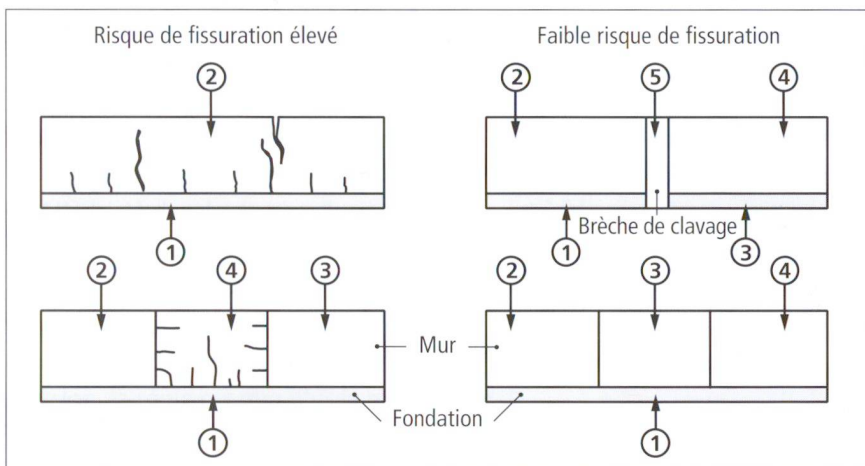


Fig. 7 L'ordre des différentes étapes de bétonnage (① → ⑤) a une grande influence sur la formation de fissures de retrait (selon [23]).

- Choix des joints tels que p.ex.
  - joints de dilatation et de retrait
  - joints de reprise
- Choix de l'armature
  - armature ordinaire
  - précontrainte
  - fibres (voir [18])
- Choix des étapes d'exécution et du programme de bétonnage
- Choix du diamètre maximum des granulats.

### De la conception

Dans les systèmes statiquement déterminés avec joints rapprochés, la formation de fissures dues à des contraintes mécaniques est beaucoup plus rare que dans les systèmes sta-

tiquement non déterminés (figure 6). Un autre exemple est la réalisation d'appuis de dalles en béton dans un bâtiment avec dalles de parking: des goujons ou consoles permettent de raccourcir le retrait sans occasionner de fissures. Cela peut toutefois être au détriment de la résistance aux séismes. Divers genres de joints de dilatation, de retrait et de reprise méritent également une attention particulière. Un

exemple: dans un bâtiment de 96 m de longueur, de faibles variations de température et également un faible retrait de dessiccation (humidité de l'air plus élevée) sont prévisibles dans les étages en sous-sol. On peut donc renoncer aux joints de dilatation. Dans la partie supérieure, des différences de température et un retrait de dessiccation élevés sont possibles. Deux joints de dilatation espacés de 32 m sont ici judicieux [5].

Les brèches de clavage (figure 8) sont un moyen efficace d'empêcher les fissures de retrait. Cela toutefois uniquement à condition qu'elles traversent tout l'élément d'ouvrage et soient maintenues ouvertes pendant plusieurs mois.

### Armature

Une armature ordinaire n'empêche pas la fissuration. Elle permet par exemple lors d'un retrait entravé de réduire la largeur des fissures ou de

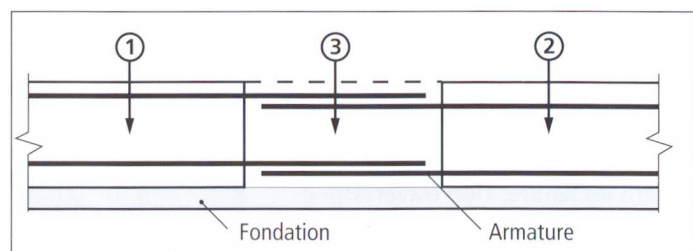


Fig. 8 Les brèches de clavage (③) sont un moyen efficace pour empêcher les fissures dues au retrait de dessiccation si elles sont laissées ouvertes suffisamment longtemps [selon [23]].

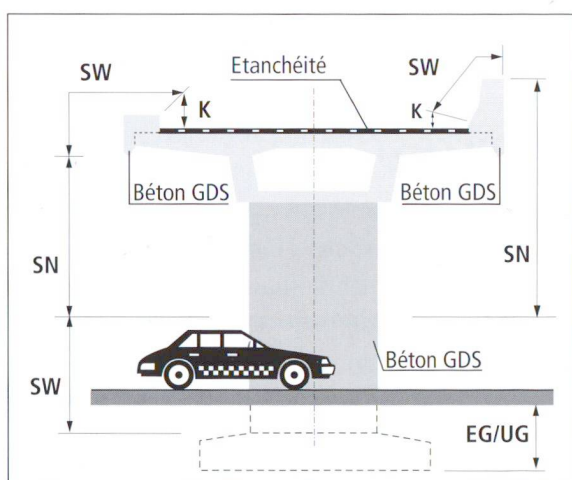


Fig. 9 Actions dans un pont (selon OFROU; abréviations voir tableau 3 (selon [7])).

répartir les fissures. On obtient ce résultat:

- en posant l'armature minimale conformément aux normes en vigueur
- en choisissant une répartition de l'armature aussi fine qu'elle est possible en pratique.

Avec une précontrainte suffisante, il est possible de limiter encore davantage les fissures ou même de les supprimer complètement [21, 22]. Pour un élément d'ouvrage de même qualité (durabilité et étanchéité à l'eau), l'armature minimale nécessaire est d'autant plus réduite que la précontrainte est forte.

### Étapes de bétonnage

Plus il y a d'étapes de bétonnage, plus le risque de formation de fissures dans l'ouvrage est grand; cela est dû au retrait différent de chacune des zones ou à l'apparition de contraintes thermiques.

Pour les grands ouvrages, les différentes étapes doivent être exécutées directement l'une à côté de l'autre et non en alternant (en échiquier). Le laps de temps entre les étapes doit en outre être aussi court que possible (figure 7).

### Granulats

Dans la première partie de cet article [18], il a été démontré que plus le diamètre maximum des granulats D est grand, plus le retrait est petit. Mais pour des raisons de construction (épaisseur de l'élément d'ouvrage, densité de l'armature, enrobage), on ne peut pas choisir D de n'importe quelle grandeur; il faut donc trouver un bon compromis.

## Durabilité des ouvrages en béton

Selon W. Schuler, de l'Office fédéral des routes (OFROU) [7], la durabilité est un critère important lors de l'évaluation des projets de détail pour les routes nationales et leurs installations techniques.

Il faut en l'occurrence tenir compte des principes suivants:

- ouvrages robustes (robustesse = insensibilité aux écarts des actions spécifiées et aux imprécisions d'exécution)
- choix de concepts/solutions éprouvés
- choix des matériaux en fonction des exigences.

Selon Schuler, il faut entendre par durabilité «la satisfaction à des exigences spécifiées en ce qui concerne

Actions/Exposition du béton	Performances particulières	Enrobage [mm]
K En contact avec l'eau	résistant au gel et aux sels de déverglaçage	80
SW Zone d'aspersion ou d'infiltration	résistant au gel et aux sels de déverglaçage	60-80
SN Zone du brouillard salin	résistant au gel	40
EG Contre terre, coffré	résistant au gel	40-60
UG Non coffré (faces supérieures)	résistant au gel	40-60
OE Zones hors actions spéciales	résistant au gel	40
Dalle de roulement (sous étanchéité)	résistant au gel	40
Bétonné contre terre	résistant au gel	≥ 60

Tab. 3 Exigences pour les éléments béton (selon «Elaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales») [7].

## Le système bonus/malus est-il la clé du succès?

### Attrait financiers du point de vue du maître d'ouvrage

Selon R. Suter [11a], ingénieur cantonal, le canton de Soleure a été souvent confronté à la situation dans laquelle des ouvrages ne répondaient que partiellement à la qualité fixée par contrat. Pour des durées d'utilisation prévues de 60 ans et plus, des prolongations de la garantie jusqu'à 10 ans (délai de prescription absolu) ne représentaient dans la plupart des cas pas une indemnisation, ou pas une indemnisation suffisante, pour la part d'aptitude au service manquante.

### Qualité du béton fixée par contrat

Selon Suter [11a], un management de la qualité clairement défini, établi en fonction du projet, est en l'occurrence une aide. Les spécifications concernant les matériaux sont déjà définies lors de l'appel d'offres (valeurs cibles). Pour les bétons, cela peut être par exemple la résistance à la compression et la résistance au gel et aux sels de déverglaçage. Des essais préliminaires sont ensuite demandés à l'entrepreneur avant la conclusion du contrat, lesquels permettent de fixer les valeurs indicatives. Les contrôles pendant la production sont également déterminés,

l'entrepreneur étant compétent pour le béton frais, et le maître d'ouvrage pour le béton durci. Par le biais de l'entrepreneur général, le maître d'ouvrage exige en outre des fournisseurs de béton des mesures d'assurance de la qualité. Les entrepreneurs doivent veiller à ce qu'il soit satisfait aux exigences minimales fixées par contrat.

### Aspects juridiques

Des rabais figurent déjà dans l'appel d'offres, lesquels entrent en vigueur lorsque les buts fixés ne sont pas atteints. De tels rabais sont prévus dans la norme SIA 118 [25].

Les réductions de prix, telles qu'elles figurent dans le *tableau 4*, n'entrent en vigueur que lorsqu'un entrepreneur, même après des améliorations, ne peut pas fournir la qualité fixée par contrat pour un élément d'ouvrage; ces réductions s'appliquent à l'ensemble de l'élément d'ouvrage.

En cas extrême, lorsque la qualité se situe au-delà de la valeur limite fixée, le maître d'ouvrage peut faire démolir un élément d'ouvrage aux risques et dépens de l'entrepreneur et le faire reconstruire ou bien compter le taux de réduction maximal.

### Efficacité des mesures

Selon Suter [11a], le système bonus/malus esquissé ici est une approche pragmatique de l'assurance de la qualité dans les travaux de construction. Toujours selon Suter, des expériences positives ont été faites dans le canton de Soleure avec ce système pour les quatre grands tunnels de la A 5. On a choisi comme propriétés convenant pour le système bonus/malus: résistance à la compression, rapport eau/ciment, résistance au gel et aux sels de déverglaçage GDS<sub>N50</sub>, perméabilité à l'eau et retrait  $\Delta S$  100/10-60 [18] (*tableau 4*). Mais c'est seulement pour un retrait réduit qu'un bonus a été octroyé. Pour les autres propriétés du béton, des «surqualités» (p. ex. résistances élevées) n'étaient pas désirées du tout.

Pour le *tunnel Birchi*, 33 500 m<sup>3</sup> de béton B 35/25 GDS 80 ont satisfait aux exigences posées. Pour bien 40 000 m<sup>3</sup> de béton B 40/30 imperméable à l'eau, avec différentes performances requises pour la résistance au gel et aux sels de déverglaçage, il a été satisfait aux exigences minimales en ce qui concerne la résistance mécanique et la résistance au gel et aux sels de déverglaçage. Par contre, en ce qui

concerne le retrait, 108 m<sup>3</sup> de béton imperméable à l'eau (peu sujet au retrait) ont été l'objet d'un malus, et 489 m<sup>3</sup> d'un bonus.

### Expériences d'un entrepreneur

S. Briggen [11b] a fait part du point de vue de l'entrepreneur concernant les expériences faites lors de la construction du tunnel *Witi*, un autre ouvrage de la A 5 dans le canton de Soleure. Il s'agissait concrètement des deux rampes, pour lesquelles des bétons à très faible retrait étaient exigés.

Les rampes ont 359 m et 285 m de longueur, les radiers ont jusqu'à 1,40 m d'épaisseur et jusqu'à 40 m de largeur, et les murs jusqu'à 8 m de hauteur.

On a mis en place au total 27 500 m<sup>3</sup> de béton B 40/30 imperméable à l'eau ou B 40/30 GDS imperméable

à l'eau. Les calculateurs ont déjà tenu compte du bonus prévu pour un retrait  $\Delta S \leq 0,21 \text{ ‰}$  (mesuré avec la méthode d'essai spéciale différant de celle de l'essai n° 4 de la norme SIA 162/12 [16]).

Cela était très audacieux, car pour des bétons dont la formulation n'est pas spécialement axée sur un faible retrait,  $\Delta S$  100/10–60 (voir [18]) se situe à peu près entre 0,30 et 0,35‰. Vu les exigences particulières concernant le retrait, et mis à part des essais préliminaires très poussés, il était nécessaire que tous les intervenants collaborent étroitement. En plus de l'eau, des granulats (0/32 mm) et du ciment Portland calcaire CEM II/A-L 32,5 R, le mélange finalement choisi contenait également un superfluidifiant, un entraîneur d'air et un adjuvant réducteur de retrait.

La cure du béton des radiers a été faite avec des curing compounds et, après un jour, avec des nattes thermo-isolantes. La chaleur d'hydratation n'a pas été dissipée spécialement.

Le béton utilisé s'est révélé approprié. Basé sur les mesures du retrait faites à intervalles réguliers selon la méthode soleuroise, le retrait  $\Delta S$  100/10–60 a été dans un seul cas supérieur à 0,21 ‰. Du bonus maximal possible de 962 000 francs, 950 000 francs ont pu être demandés.

Un résultat réjouissant pour l'«ARGE Wititunnel». L'important est toutefois l'absence de fissures ou l'étanchéité à l'eau de l'ouvrage en béton pendant toute la durée d'utilisation. On ne saura qu'au cours de ces prochaines années si la voie coûteuse choisie se justifie.

Propriété	Bonus	Valeur cible	Malus
Résistance $f_{cm}$ des cubes et carottes bonus ou malus [Fr./m <sup>3</sup> béton]	– –	$\geq 35 \text{ N/mm}^2$ $\pm 00.-$	$\geq 31 \text{ N/mm}^2$ – 30.– $\geq 27 \text{ N/mm}^2$ – 110.– $< 27 \text{ N/mm}^2$ démolition
Rapport eau/ciment bonus ou malus [Fr./m <sup>3</sup> béton]	– –	$\leq 0,48$ $\pm 00.-$	$\leq 0,50$ – 30.– $\leq 0,52$ – 90.– $> 0,54$ démolition
Résistance au gel et aux sels de déverglaçage GDS ( $N_{50}$ ) (HIE-GDS) bonus ou malus [Fr./m <sup>3</sup> béton]	– –	$\geq 240$ $\pm 00.-$	$\geq 180$ – 30.– $\geq 120$ – 90.– $< 120$ démolition
Perméabilité à l'eau bonus ou malus [Fr./m <sup>3</sup> béton]	– –	$\leq 8 \text{ g/m}^2\text{h}$ $\pm 00.-$	8–12 g/m <sup>2</sup> h – 30.–    13–16 g/m <sup>2</sup> h – 90.– $> 16 \text{ g/m}^2\text{h}$ démolition
Retrait $\Delta S$ 100/10–60 <sup>1)</sup> bonus ou malus [Fr./m <sup>3</sup> béton]	$\leq 0,21 \text{ ‰}$ + 35.– $\leq 0,23 \text{ ‰}$ + 17.50	0,23–0,25 ‰ $\pm 00.-$	$> 0,25-0,30 \text{ ‰}$ – 30.– $> 0,30-0,40 \text{ ‰}$ – 90.– $> 0,40 \text{ ‰}$ démolition

<sup>1)</sup> Selon méthode d'essai du canton de Soleure [18].

Tab. 4 Taux de bonus et de malus ainsi que valeurs limites pour la démolition pour la sorte de béton B 40/30 imperméable à l'eau GDS-240 pour les tunnels de la A 5 dans le canton de Soleure [11a].



la sécurité, l'aptitude au fonctionnement et l'aspect pendant une durée donnée (temps d'utilisation)».

En dehors des règles se rapportant à la durée de service figurant dans la norme SIA 162 [24], il faut également tenir compte de la directive de l'OFROU «Elaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales». On y trouve par exemple des recommandations pour les exigences et les mesures concernant des éléments d'ouvrage diversement exposés (figure 9).

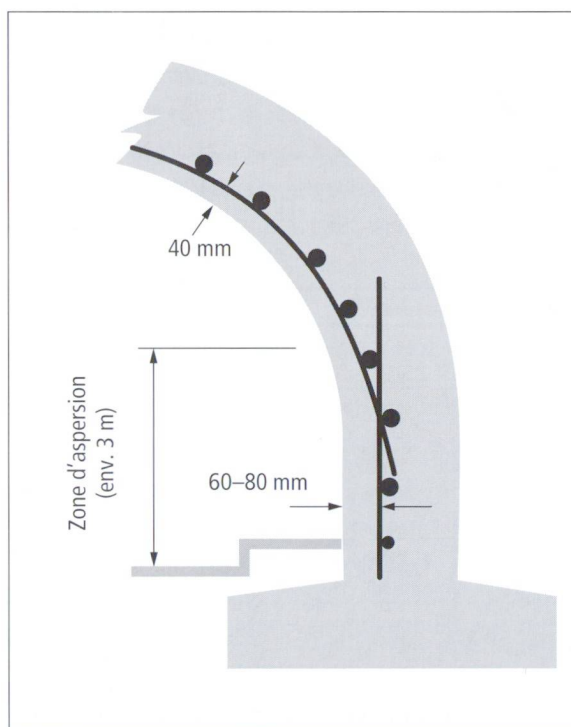


Fig. 10 Enrobage minimal dans la zone de projections d'eau d'un tunnel (selon [7]).

### Retrait et durabilité

Le retrait est d'une part une propriété propre aux bétons, mais d'autre part il agit également sur des parties ou sur l'ensemble d'un ouvrage. Le retrait ou le retrait différentiel a pour conséquence des contraintes à l'intérieur de la section et des contraintes secondaires dans le système. Recoupant des observations déjà mentionnées précédemment, Schuler a dit [7]: «Différentes études indiquent que des fissures jusqu'à env. 0,4 mm de largeur n'ont en général

pas de conséquences fâcheuses en ce qui concerne la corrosion de l'armature. Les facteurs les plus importants sont l'étanchéité et l'épaisseur du béton d'enrobage. C'est pourquoi des mesures relevant de la construction et de la technologie du béton sont plus efficaces qu'un calcul précis de la limitation de la largeur des fissures.»

Un faible volume de pores capillaires exerce une action positive sur l'étanchéité de l'enrobage. Pour des éléments d'ouvrage contaminés par des chlorures, des mesu-

### Mots-clefs

Chlorures, corrosion, durée de service, durée d'utilisation, fissures, fissures de retrait, fissures dues à la flexion, fissures traversantes, système bonus/malus

res de protection limitées dans le temps telles qu'imprégnations hydrophobes sont selon Schuler à conseiller [7].

Dans les zones à concentrations de chlorures très élevées, c'est-à-dire dans les zones de contact et les zones d'aspersion, la limitation des fissures et un béton dense, résistant au gel et aux sels de déverglaçage, ne suffisent pas pour garantir la durabilité visée. C'est pourquoi des mesures telles que protection de surface, armature revêtue ou armature inoxydable sont nécessaires.

Une autre solution est d'augmenter l'épaisseur de l'enrobage (figure 10). Des enrobages de 60–80 mm ne sont toutefois pas faciles à réaliser.

### Frais d'entretien

«La durabilité d'un ouvrage est déterminée par l'efficacité des mesures prises pour lutter contre le processus de dégradation du béton armé. Toutes les mesures, ayant pour objectif de diminuer le phénomène de fissuration lié au retrait, constituent une contribution efficace et permanente pour augmenter la durabilité d'un ouvrage.» C'est ainsi que R. Leutwy-

ler a terminé son exposé sur la durabilité des ouvrages du point de vue du maître d'ouvrage.

Pour les ponts, il faut compter sous nos latitudes avec des frais d'entretien annuels se montant à 1 % de la valeur de remplacement de l'ouvrage. Les travaux d'entretien ne sont toutefois pas effectués chaque année, mais à de plus grands intervalles (figure 11). Cela également parce qu'il faut pendant la remise en état maintenir le trafic et garantir la sécurité des usagers et de la main-d'œuvre; une durabilité améliorée réduit également la fréquence des remises en état.

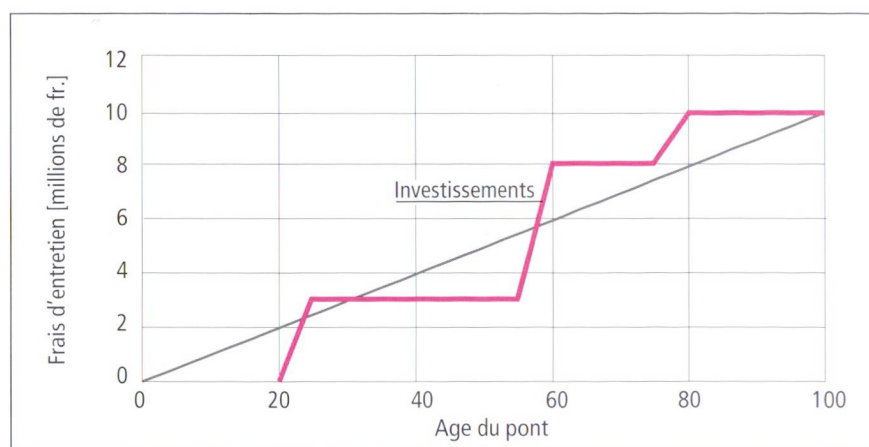


Fig. 11 Frais d'entretien d'un pont coûtant 10 millions de francs avec une durée d'utilisation de 100 ans (selon [1]).

Parmi les mesures ayant des effets particulièrement positifs sur la durabilité des ponts, on compte entre autres [1]:

- technologie du béton
  - béton dense
  - béton peu sujet au retrait
  - traitement de cure
- armature revêtue de résine époxy
- armature inoxydable
- exécution de l'armature selon norme SIA 162 [24]
- enrobage suffisant.

Il existe en outre d'autres possibilités telles que protections des surfaces, dont l'effet est toutefois de durée limitée et qui doivent être renouvelées périodiquement.

#### Pour conclure

«La limitation du retrait n'est pas un but en soi», a déclaré Jacoud [5, 9]. Ce qui est important, c'est de réduire à un minimum les conséquences nuisibles du retrait, à savoir la fissuration due à un retrait entravé. En l'occurrence, il s'agit souvent de trouver des compromis entre des exigences contradictoires.

Dans cette optique, se focaliser unilatéralement sur la minimisation du retrait n'est certainement pas la solution optimale.

## BIBLIOGRAPHIE

En dehors des indications données par les orateurs des séminaires du TFB, les publications suivantes ont été utilisées ou citées:

- [18] **Jacobs, F.**, et **Hermann, K.**, «Maîtrise du retrait pour la réalisation d'ouvrages durables en béton (1)», Bulletin du ciment 69 [4], 3–7 (2001).
- [19] «CEB-Guide to durable concrete structures», Bulletin d'information 166, 30 (1985).
- [20] **Lunk, P.**, **Müller, T.**, et **Wittmann, F. H.**, «Feuchtigkeits- und Ionentransport in gerissenen Stahlbetonbauteilen», édité par l'Office fédéral des routes (1998).
- [21] **Laurencet, P.**, «Précontrainte et armature pour contrôler l'ouverture résiduelle des fissures», thèse n° 2028 (1999), EPFL, Lausanne.

- [22] **Laurencet, P.**, et **Jaccoud, J.-P.**, «Fissuration, étanchéité, et durabilité des structures en béton armé», Annales du bâtiment et des travaux publics n° 6, 13–22 (déc. 2000).
- [23] **Favre, R.**, **Jaccoud, J.-P.**, **Burdet, O.**, et **Charif, H.**, «Dimensionnement des structures en béton – Aptitude au service et éléments de structures», vol. 8 du «Traité de génie civil de l'EPFL, PPUR», nouvelle édition, 594 pages (1997).
- [24] Norme SIA 162: «Ouvrages en béton» (édition 1993).
- [25] Norme SIA 118: «Conditions générales pour l'exécution des travaux de construction» (édition 1977/1991.)