Zeitschrift: Bulletin du ciment

Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)

Band: 69 (2001)

Heft: 11

Artikel: Résistance aux chlorures des bétons

Autor: Merz, Christine / Ungricht, Heidi

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-146565

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: 10.12.2025

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

Résistance aux chlorures des bétons

Dans les ouvrages menacés par la corrosion, la résistance du béton à la pénétration des ions chlorure est une des propriétés les plus importantes.

Dans les ouvrages menacés par la corrosion, la résistance du béton à la pénétration des ions chlorure est une des propriétés les plus importantes. La corrosion de l'armature est une des principales causes de dégâts dans les ouvrages en béton armé des routes. Elle est provoquée par la pénétration de sels. Un enrobage de béton insuffisant et/ou une trop faible étanchéité de la couche de béton supérieure peuvent entraîner des dégâts après peu de temps déjà.

Les travaux de remise en état coûtent de plus en plus chers et, en raison du volume croissant du trafic, sont de plus en plus difficiles à réaliser. Un groupe de travail constitué par le Conseil fédéral a publié en 1998 un rapport [2] proposant des mesures pour assurer à moindres coûts une conservation du réseau des routes nationales satisfaisante du point de vue technique. Des recherches sur le thème «entretien zéro» y sont entre autres recommandées. Selon la définition du groupe de travail, «la notion d'entretien zéro s'applique aux méthodes de construction qui se distinguent par une durée de vie extrêmement longue avec un entretien très réduit».

La durée d'utilisation sans entretien des ouvrages en béton armé est influencée de façon déterminante par le moment de l'apparition de corrosion induite par les chlorures et par la vitesse de développement des dégâts. C'est pourquoi, dans un ouvrage menacé par la corrosion, la résistance du béton à la pénétration des ions chlorure est une des propriétés les plus importantes. Cette propriété est désignée dans ce qui suit par «résistance aux chlorures».

Mécanismes de transport et grandeurs caractéristiques

Divers mécanismes de transport peuvent amener les ions chlorure dans le béton. Dans la zone superficielle du béton non saturée d'eau, c'est normalement l'absorption capillaire («Huckepack»-Transport) qui domine. A de plus grandes profondeurs, où l'humidité du béton est constante, les ions chlorure se déplacent par diffusion à travers les pores, la force motrice étant en l'occurrence l'équilibre des concentrations ioniques dans l'eau interstitielle.
Les modes de transport dans le béton importants pour la résistance aux chlorures, ainsi que les grandeurs caractéristiques s'y rapportant, figurent dans le *tableau 1*.

Résistance à la corrosion induite par les chlorures

La résistance à la corrosion induite par les chlorures d'un élément d'ouvrage en béton armé est d'autant plus élevée que

- l'absorption capillaire et le coefficient de diffusion des chlorures du béton sont faibles ou que le béton est étanche
- l'enrobage de béton est épais
- la capacité du ciment de fixer les chlorures est élevée
- la teneur en chlorures critique pour une corrosion d'importance est élevée
- la résistance électrique du béton et les résistances électrochimiques sont élevées.

Mode de transport	Force motrice	Coefficient de transport	Grandeur caractéristique [unité]
Absorption capillaire	Pression capillaire	Coefficient d'absorption d'eau Coefficient de pénétration d'eau	k_A [g/m^{2}s^{0,5}] k_E [m/s^{0,5}]
Diffusion ionique	Gradient de concentration	Coefficient de diffusion	D [m^2/s]
Perméation d'eau	Chute de pression absolue	Coefficient de Darcy	k_D [m/s]
Migration	Champ électrique à tension continue	Mobilité ionique	u_i [cm^2/Vs]

Tab. 1 Les principaux modes de transport des chlorures dans les bétons avec les grandeurs caractéristiques s'y rapportant (selon [3]).

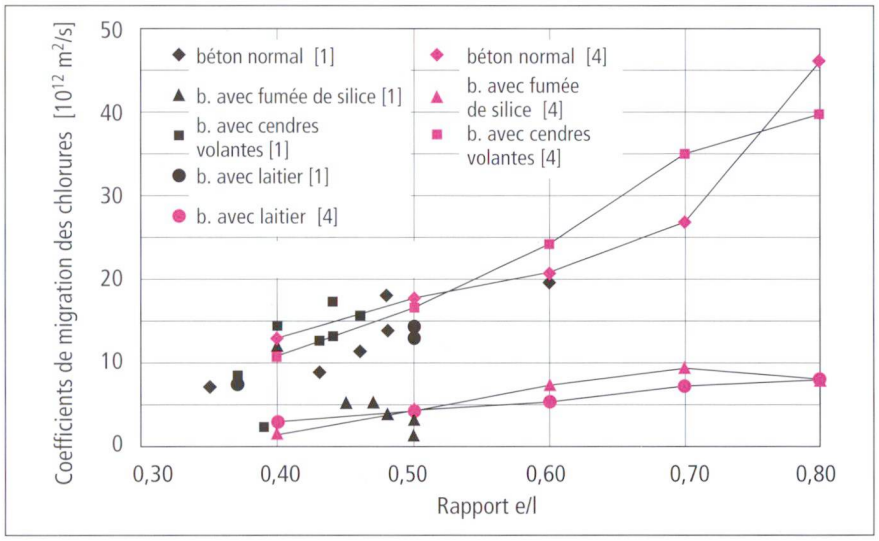

Fig. 1 Coefficients de migration des chlorures en fonction des valeurs eau/liant; données du TFB [1] et [4] (bétons de laboratoire et bétons de projets de tiers à l'âge de 28 jours).

Dessins: TFB

Il existe donc différentes possibilités pour assurer ou augmenter la durabilité des ouvrages en béton armé. Dans de nombreux cas, un enrobage de béton suffisant combiné avec une qualité du béton judicieuse est la mesure la plus efficace pour garantir la durabilité nécessaire.

Béton étanche

En ce qui concerne la durabilité, l'étanchéité ou la perméabilité est le critère de qualité le plus important pour un béton. En dehors d'éventuelles fissures, c'est le système poreux qui détermine l'étanchéité. Selon leur origine, leur forme et leur grandeur, on distingue les pores de compactage, les pores capillaires et les pores du gel. La distribution des diamètres des pores ainsi que le pourcentage volumique de pores de compactage, pores capillaires et pores du gel dépendent avant tout du dosage en ciment, du rapport e/c et du degré d'hydratation du ciment.

Les bétons jeunes sont plus poreux que les bétons plus âgés.

Les différents pores sont interconnectés; ils forment un système communicant, qui, dans la zone de contact avec les granulats, est particulièrement perméable. Ce sont surtout les pores capillaires qui sont responsables de l'absorption d'eau et de substances nuisibles. C'est pourquoi un béton «étanche» présente un plus faible pourcentage de pores capillaires accessibles à l'eau. En dehors des pores capillaires, les fissures constituent des voies directes et rapides pour la pénétration de substances nuisibles. C'est pourquoi il est important de limiter la largeur des fissures au moyen de l'armature et de mesures de construction.

Le danger provient toutefois en majeure partie des fissures où de l'eau s'écoule; les fissures sèches, ou les fissures alternativement sèches et humides, sont relativement anodines.

Augmentation de l'étanchéité

Pendant l'hydratation des ciments, de l'eau (environ 40 % de la masse de ciment initiale) est fixée chimiquement ou physiquement. Les bétons avec un rapport e/c supérieur à 0,40 contiennent ainsi de l'eau libre excédentaire, qui, lorsqu'elle s'évapore, forme des pores. Autrement dit, plus le rapport e/c est élevé, plus il se forme de pores capillaires, lesquels peuvent absorber de l'eau et, en même temps, des substances nui-

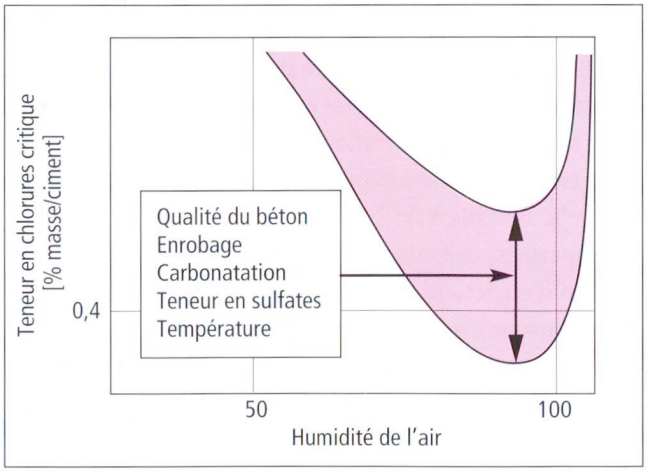

Fig. 2 Influences sur la teneur en chlorures critique pour la corrosion induite par les chlorures (selon [3]).

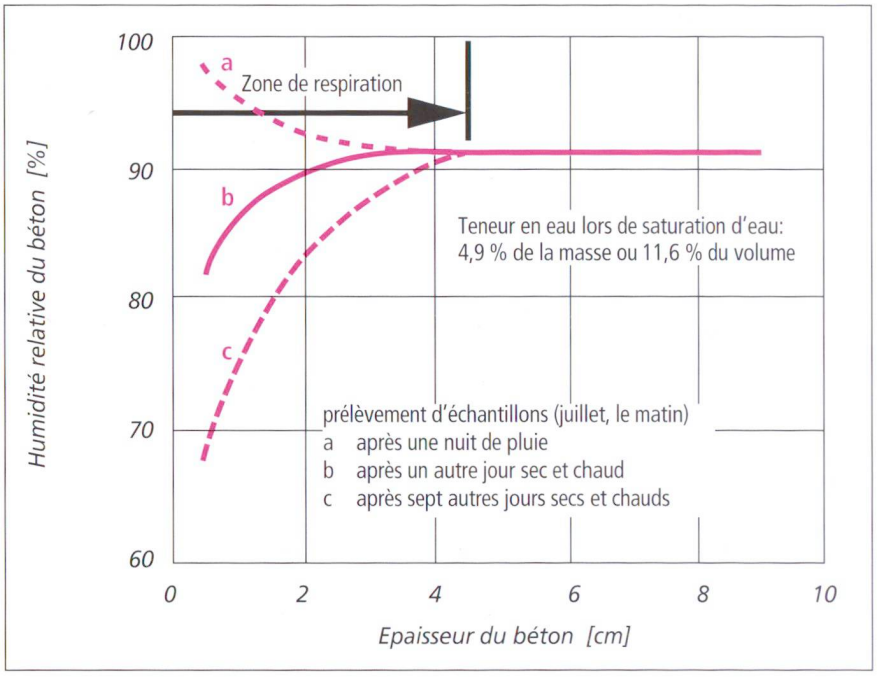

Fig. 3 Influence de l'environnement sur la teneur en eau d'un môle à Helgoland (déterminé sur carottes), selon [5].

sibles. Les plastifiants et superfluidifiants (BV et HBV) permettent d'obtenir un bas rapport e/c.
Les bétons dont les granulats forment un ensemble aussi compact que possible et dont le diamètre maximum est aussi grand que possible (bonne courbe granulométrique) exigent moins de pâte de ciment; ils sont ainsi plus étanches.
Les ajouts à propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques latentes, tels que cendres volantes riches en calcium et laitiers ou fumées de silice, exercent sur la structure du béton une action d'étanchement de longue durée, car leurs produits de réaction remplissent les pores.
Des études sur l'influence de la composition du liant et du rapport moyen eau/liant (e/l) sur les coefficients de migration des chlorures dans les bétons sont résumées à la *figure 1.*
Une plus grande finesse de mouture du ciment permet également d'obtenir une structure poreuse plus fine de la pâte de ciment durcie.

Fixation des chlorures
Seuls les ions chlorure libres favorisent la corrosion. La pâte de ciment durcie peut fixer certaines quantités de ions chlorure, chimiquement ou physiquement. Les ions chlorure étant en outre moins mobiles que l'eau, des gradients se forment relativement rapidement. Lors de sollicitations répétées, l'effet filtrant de la pâte de ciment durcie s'épuise, et les chlorures pénètrent plus profondément dans le béton.
Les bétons composés de ciments résistant aux sulfates à faible teneur en C_3A, ainsi que ceux composés de liants hydrauliques dans lesquels CEM I est remplacé partiellement par de la fumée de silice, fixent comparativement peu de chlorures, et les bétons composés de ciments avec fort pourcentage de laitier, relativement beaucoup. Les bétons à forte teneur en sulfates témoignent également d'une faible capacité de fixer les chlorures. Quant aux bétons carbonatés, il ne peuvent plus guère fixer les ions chlorure.

Teneur en chlorures critique
La corrosion par piqûres de l'armature dans le béton armé ne se produit que lorsque la teneur en chlorures a dépassé une valeur critique. Bien que l'on se base souvent sur une valeur limite de 0,4 % de ions chlorure (par rapport à la masse de ciment), la valeur limite dépend en réalité de nombreux paramètres *(figure 2),* par exemple

- humidité du béton
- valeur pH de l'eau interstitielle
- rapport massique Cl^-/Na^+
- capacité du ciment de fixer les ions chlorure
- qualité et épaisseur de l'enrobage de béton (apport d'oxygène)
- teneur de la pâte de ciment durcie en autres substances favorisant la corrosion, par exemple SO_4^{2-}.

Pénétration des chlorures dans les bétons

Comme déjà mentionné, c'est principalement par absorption capillaire et par diffusion que les ions chlorure pénètrent dans les bétons. Les ions chlorure contenus dans l'eau de gâ-

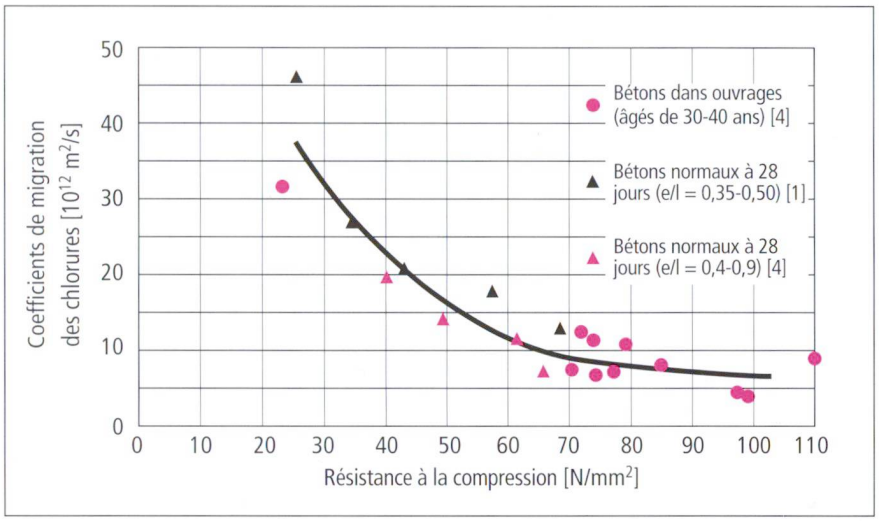

Fig. 4 Coefficients de migration des chlorures de bétons normaux et de bétons dans ouvrages en fonction de la résistance à la compression.

chage ou dans les granulats n'ont généralement pas d'importance.
En cas de cycles séchage/humidité relativement fréquents, p. ex. dans la zone d'aspersion, une concentration de ions chlorure se produit très rapidement dans la zone de respiration du béton (partie de la couche supérieure réagissant aux variations d'humidité de l'air, voir *figure 3)*. Plus la zone de respiration est grande, plus la profondeur du transport rapide de chlorures dans le béton l'est aussi. Ce transport s'effectue principalement par absorption capillaire.

Les ions chlorure se trouvant directement à la surface peuvent être éliminés par lessivage, alors qu'à l'intérieur, ils atteignent de plus grandes profondeurs par diffusion. Si le processus d'absorption et de séchage se répète souvent au cours des années, les teneurs en chlorures des bétons peuvent être parfois très élevées.

Dans EN 206-1:2000 [6], des classes d'exposition sont définies, grâce auxquelles il est tenu compte de la grande influence qu'exercent les sollicitations et les conditions environnementales sur la pénétration de ions chlorure. La classe XD, avec les trois sous-classes XD1, XD2 et XD3 basées sur les conditions environnementales (humidité), est déterminante pour la corrosion induite par les chlorures *(tableau 2)*.

Détermination de la résistance aux chlorures

De nombreuses méthodes de laboratoire ont été mises au point pour déterminer la résistance aux chlorures. On peut les diviser en groupes, qui sont les suivants:

- *tests de diffusion,* c'est-à-dire détermination des coefficients de diffusion des ions chlorure dans le béton par analyse des profils des chlorures ou par modification dans le temps de la concentration de chlorures dans les cellules de diffusion
- *tests de migration,* c'est-à-dire tests de diffusion accélérée par établissement d'une tension électrique; résultat: coefficient de migration des chlorures dans le béton (test CTH ou ibac [7])
- mesure de la *conductivité électrique* sur des échantillons saturés de solution de chlorure de sodium concentrée (test Streicher [8])
- mesure du flux ionique selon ASTM C 1202-94 [10]
- exposition d'échantillons à une solution chlorée (comparaison des profils des chlorures dans le béton): ponding test [9].

Lors des tests de diffusion simples, l'éprouvette sépare une solution contenant des chlorures d'une solution qui en est exempte. Le coefficient de diffusion DCI est calculé soit à partir de la profondeur de pénétration des ions chlorure dans l'éprouvette, soit à partir de la modification dans le temps de la concentration de ions chlorure dans la solution initialement exempte de chlorures.
En établissant une tension continue sur les cellules de diffusion, on accélère cent fois et plus la migration des ions. Mais le champ électrique n'a aucune influence sur la véritable dif-

Correction

Dans le «Bulletin du ciment» d'octobre de cette année en page 3 (colonne centrale) il faut lire:

- CEM III B et CEM III C.

Nous vous prions de nous excuser pour cette erreur. Kurt Hermann

fusion des chlorures ou autres ions; ce sont les coefficients de migration qui sont mesurés, et non les coefficients de diffusion.

Le test ibac [7] permet de mesurer la profondeur de pénétration des ions chlorure dans des éprouvettes (Ø = 50 mm, h = 50 mm) saturées d'eau provenant s'une solution de chlorure de sodium à 3 %. Pour accélérer la migration des chlorures, on établit une tension de 30-40 volts pendant $^1/_2$ à 7 jours.

Classe d'exposition	Environnement	Coefficient de migration
XD1	Humidité modérée. (Surfaces de béton exposées à des chlorures transportées par voie aérienne.)	$\leq 20\ 10^{-12}\ m^2/s$
XD2	Humide, rarement sec. (Piscines. Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures.)	$\leq 15\ 10^{-12}\ m^2/s$
XD3	Alternance d'humidité et de séchage. (Eléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées. Dalles de parc, de stationnement de véhicules.)	$\leq 10\ 10^{-12}\ m^2/s$

Tab. 2 Performances minimales requises des bétons pour la classe d'exposition XD (corrosion induite par les chlorures) dans la préface nationale de EN 206-1 [6].

Bétons à haute résistance aux chlorures

La résistance aux chlorures des bétons peut être améliorée par la réduction du rapport e/c, par l'adjonction de fumée de silice (également avec un dosage de seulement 7 % de la masse de ciment) et par l'adjonction de cendres volantes (30 % de la masse) [1].

Des études faites au TFB [1] et par Mackechnie [4] démontrent qu'il existe bel et bien un rapport entre les coefficients de migration des chlorures selon ibac [7] et la résistance à la compression *(figure 4)*.

Le test ibac ou CTH est une méthode convenant pour déterminer la résistance aux chlorures en laboratoire. Pour la classe d'exposition XD (corrosion induite par les chlorures), il est proposé en Suisse, dans la préface nationale de la norme EN 206-1, pour les sous-classes XD1 à XD3, les coefficients de migration figurant dans le *tableau 2* (calculés avec la méthode ibac). Ces performances minimales sont provisoires et doivent encore être confirmés au moyen d'autres études sur des bétons de laboratoire et des bétons dans des ouvrages, ainsi que par des essais de longue durée.

Christine Merz
et *Heidi Ungricht, TFB*

BIBLIOGRAPHIE

Le présent article est basé en majeure partie sur des manuscrits destinés à la publication suivante:

[1] **Fritz Hunkeler, Christine Merz** et **Heidi Ungricht**, «Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen».

Cette publication paraîtra probablement cette année sous forme de rapport VSS.

Le texte renvoie en particulier aux publications suivantes:

[2] «Conservation du réseau des routes nationales», rapport final du groupe de travail, Office fédéral des routes, Berne (1998).

[3] **Hunkeler, F.**, «Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten», rapport VSS n° 510 (1994).

[4] **Mackechnie, J. R.**, et **Alexander, M. G.**, «Rapid chlorid test comparisons», Concrete International **22** [5], 40–45 (2000).

[5] **Rehm, G.**, «Chloridkorrosion von Stahl in gerissenem Beton – B: Untersuchungen an der 30 Jahre alten Westmole in Helgoland», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton **390**, 59–88 (1988).

[6] EN-206-1: «Béton – Partie 1: Spécification, performances, production et conformité» (projet définitif de janvier 2000 approuvé).

[7] **Tang, L.**, et **Nilsson, L.-O.**, «Rapid determination of chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field», ACI Materials Journal **98** [1], 49–53 (1992).

[8] **Streicher, P. E.**, et **Alexander, M. G.**, «A chloride conduction test for concrete», Cement and Concrete Research **25** [6], 1284–1294 (1995).

[9] AASTHO T259-80: «Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration».

[10] ASTM C 1202-94: «Standard method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride penetration».

Mots-clés

Diffusion des chlorures, entretien zéro, ions chlorure, méthode ibac, migration des chlorures, résistance aux chlorures.