Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 124 (1998)
Heft: 26

Artikel: Détection et évaluation de la corrosion des armatures
Autor: Menn, Christian
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79424

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: 08.01.2026

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

Détection et évaluation de la corrosion des armatures

Par Christian Menn, Coire

Les problèmes de corrosion dans les ouvrages en béton armé ont longtemps été négligés. On partait du principe que pour éviter la corrosion des armatures, il suffisait de dimensionner leur enrobage en fonction de l'exposition des éléments d'ouvrage concernés, de répartir les fissures et d'en limiter l'ouverture. Or on a, entre-temps, dû se rendre à l'évidence : ces mesures sont loin d'assurer la durabilité du béton armé et des dommages importants (avant tout dus au sel), obligeant à de coûteux relevés de l'état des ouvrages, eux-mêmes suivis de très onéreuses interventions, ont, depuis quelques années, modifié l'ordre de priorité attaché aux problèmes de corrosion des armatures.

Il y a quarante ans, on estimait que la sécurité et le comportement d'un ouvrage étaient directement proportionnels à l'exactitude avec laquelle on évaluait les contraintes auxquelles il était soumis. On ne voulut plus se satisfaire des paramètres clés – soit l'équilibre et le modèle en treillis – établis par Mörsch pour la construction en béton armé, pas plus qu'on ne consentit à investir dans le développement de ces principes de dimensionnement simples. S'appuyant sur l'hypothèse axiomatique du comportement élastique des matériaux (théorie de l'élasticité), on a calculé des solutions et des répartitions de contraintes exactes dues aux charges, co-actions et précontraintes s'appliquant aux structures (en tenant compte des phénomènes de retrait et de fluage). Or depuis que l'on dimensionne à partir de la sécurité de la structure, ce type de calcul n'est plus guère utilisé (du moins par la majorité des ingénieurs) que pour des vérifications sommaires ; on a en effet appris qu'en conditions d'équilibre et sous réserve d'un contrôle général du comportement élastique à l'état de service, aucun déficit statique n'était à craindre. De plus, un calcul des contraintes supposé exact s'avère toujours illusoire en pratique, car d'innombrables facteurs secondaires imprévisibles entrent en jeu, lors de l'exécution notamment. Cela étant, il importe aujourd'hui d'assurer la durabilité des ouvrages par des solutions techniques appropriées, de même que l'étendue et les effets de la corrosion doivent pouvoir être calculés en cas de dommages et pour la remise en état des structures.

Deux paramètres clés interviennent également dans l'évaluation des problèmes de corrosion : la dépassivation et la vitesse de corrosion. Le terme de dépassivation désigne la détérioration ou la destruction du film passif entourant les armatures. Ce phénomène permet au processus de corrosion (lorsque le béton présente une humidité et une porosité suffisantes et qu'assez d'oxygène parvient jusqu'à l'armature) de se déclencher effectivement. Quant à la notion de vitesse de corrosion, elle renvoie à la perte moyenne de poids ou de section de l'armature par unité de temps. Or si, en tant que tels, ces paramètres clés sont connus depuis un certain temps déjà, on s'efforce aujourd'hui – comme on l'a fait pour les problèmes de dimensionnement – d'acquérir non seulement une compréhension plus profonde des phénomènes en jeu, mais on cherche également à établir des modèles exacts des processus de corrosion. Ces objectifs se reflètent dans des travaux scientifiques, où l'on peut lire des propositions telles que celle-ci : « Les vitesses de corrosion sont des valeurs ponctuelles, qui fluctuent en fonction des conditions environnementales (température, humidité). Pour calculer la durée d'utilisation restante, respectivement estimer la date d'une prochaine remise en état de l'ouvrage, il faut toutefois disposer de données pondérées sur la perte de section annuelle. » Or compte tenu de la dispersion des facteurs déterminant *a priori* la dépassivation et la vitesse de corrosion (enrobage de l'armature, profondeur de carbonatation, teneur en chlorures, fluctuations des taux d'humidité dans le béton, porosité du béton, apports d'oxygène, température, etc.), il faut s'attendre à ce qu'un pronostic de la perte de section un tant soit peu fiable s'avère aussi problématique qu'un calcul exact des contraintes, sans compter qu'il faudrait encore tenir compte des effets différés dus à des travaux de remise en état et des mesures de protection du béton. Finalement, il faudrait encore considérer la disposition des armatures, de même que la perte de sécurité admissible à une date ultérieure, et pour procéder à tous ces examens, il faudrait immanquablement s'appuyer sur un relevé extensif et coûteux de l'état de l'ouvrage.

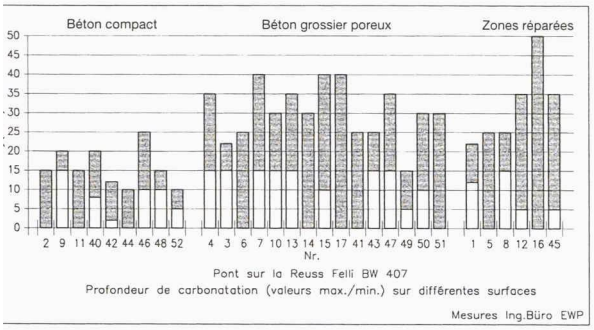
C'est pourquoi, il devrait être beaucoup plus efficace de partir d'une méthode simple, intégrant les paramètres clés de la corrosion, et d'en dissiper les inexactitudes par le biais de recherches ciblées.

Méthode pour l'évaluation de la corrosion d'armatures

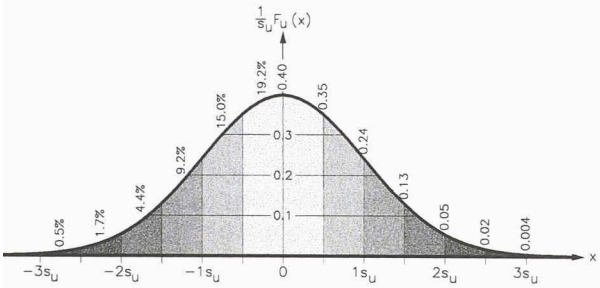
En règle générale, on ne constatera pas que les armatures d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage rouillent ou ne rouillent pas : du fait de la forte dispersion des valeurs prises par les paramètres en jeu, la corrosion ne touche le plus souvent qu'une partie des armatures.

En raison de cette dispersion relativement importante et de l'interdépendance des facteurs causals, la détection et l'évaluation de la corrosion d'armatures constitue un problème probabiliste, dont la solution ne réside pas dans l'assignation de valeurs admissibles, respectivement inadmissibles, aux paramètres.

L'objectif d'une évaluation de l'état doit donc être de déterminer, par un calcul de probabilité théorique aussi simple que possible, si la part d'armatures dépassivées,



g. 1.- Profondeurs de carbonatation, mesures effectuées sur le ont de Felli



g. 2.- Distribution normale F_u *d'une variable* u

respectivement la probabilité d'une dépassivation, est admissible ou non, compte tenu de la vitesse de corrosion et d'autres facteurs annexes relatifs à la sécurité de la structure et éventuellement son aptitude au service (aspect).

A partir des résultats fournis par le relevé de l'état dans les zones d'ouvrage sensibles et semblablement menacées par la corrosion, il s'agit d'abord de déterminer

– la probabilité de dépassivation
– et la vitesse de corrosion,

avec un taux de fiabilité (du point de vue du concepteur) tel que l'importance des dégâts sera au plus sous-estimée avec une marge d'erreur de 10 % et surestimée avec une marge d'erreur d'environ 30 à 50 %.

Calcul de la probabilité de dépassivation

Dans la grande majorité des cas, la dépassivation résulte de la destruction – sous l'effet de chlorures ou de l'abaissement du pH de l'eau intersticielle dû à la carbonatation – du film passif à la surface de l'armature.

La probabilité de dépassivation devrait toujours être déterminée dans des zones d'ouvrage analogues, soumises à des risques de corrosion presque identiques (teneur en chlorures, carbonatation, taux d'humidité et porosité du béton, etc.). Pour les effets des chlorures, il faudra par exemple se concentrer sur des zones recevant des eaux de contact et de fortes projections, des zones intermédiaires touchées par des eaux de contact sporadiques et de faibles projections et des endroits soumis à un brumisage; pour la carbonatation, on s'attachera aux zones accessibles à la pluie ou sèches, à des surfaces bétonnées compactes ou fortement poreuses, à des nids de gravier réparés, etc.

On peut déterminer la probabilité de dépassivation soit par des mesures non destructives de potentiels, soit à partir de carottages. L'interprétation des mesures de potentiels doit être effectuée par des spécialistes expérimentés, car ces mesures ne dépendent pas seulement de la corrosion active, mais aussi de la concentration de chlorures et de l'humidité présentes dans le béton. Le pourcentage d'armatures en voie de corrosion est en principe déterminé par la fréquence cumulée des potentiels mesurés [1][1].

Comme la vitesse de corrosion est variable, la mesure des potentiels – surtout dans des zones d'ouvrage carbonatées relativement sèches, où la corrosion s'arrête parfois entièrement – ne livre qu'une valeur limite inférieure pour la probabilité de dépassivation.

Dépassivation due à la carbonatation

La dépassivation d'une armature se produit lorsque la profondeur de carbonatation excède l'épaisseur de son enrobage. La probabilité de dépassivation due à la carbonatation est donc déterminée par les deux paramètres (variables) de la profondeur de carbonisation et de l'enrobage de l'armature. Pour obtenir une approximation simple à partir des mesures correspondantes, on peut admettre une distribution normale (gaussienne) des deux paramètres.

Mesurée sur une carotte ou au marteau piqueur, la profondeur de carbonatation présente déjà une importante dispersion (fig. 1). Quant à son évolution, elle dépend de paramètres dynamiques (se modifiant dans le temps), en particulier de l'humidité et de la porosité du béton. En général, la vitesse de pénétration diminue nettement plus rapidement que d'après la règle $\sqrt{t}$ (calcul stationnaire) [1][2].

Lors de la détermination du spectre de la profondeur de carbonatation, il est recommandé, pour chaque point de mesure, de prendre en compte une fois les valeurs extrêmes supérieure et inférieure et quatre fois les valeurs moyennes.

En fonction de la fréquence F d'une variable u, la figure 2 illustre la distribution « normalisée » de la fréquence dérivée de la valeur moyenne M_u et de l'écart type s_u (distribution normale de Gauss).

La probabilité de dépassivation due à la carbonatation est réalisée par la condition $y > c$, où la variable y désigne la profondeur de carbonatation et c lépaisseur de l'enrobage de béton (fig. 3). A partir des spectres de distribution normale de

– l'enrobage de l'armature c, avec la valeur moyenne M_c et l'écart type s_c

et de

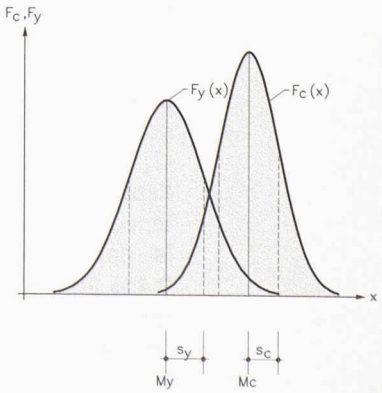


Fig. 3.- Variables y *(profondeur de carbonatation) et* c *(enrobage de l'armature) normalement distribuées*

[1] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin de chapitre

– la profondeur de carbonatation y, avec la valeur moyenne M_y et l'écart type s_y

on obtient la variation de la somme $\psi = c - y$, avec la valeur moyenne $M_\psi = M_c - M_y$ et l'écart type $s_\psi = \sqrt{s_c^2 + s_y^2}$.

La probabilité de dépassivation p_d correspond aux valeurs $\psi < 0$, qui peuvent être calculées par $M_\psi - \beta s_\psi = 0$, resp. $\beta = M_\psi / s_\psi$.

Les valeurs correspondantes de p_d sont données dans le tableau ci-dessous:

β	p_d	β	p_d	β	p_d
0	0,5	1,0	0,16	2,5	0,01
0,25	0,40	1,5	0,07	3,0	0,002
0,75	0,23	2,0	0,02	3,5	0

Dépassivation sous l'effet de chlorures

Pour déterminer la probabilité d'une dépassivation due aux chlorures, on procédera à des carottages en des points stratégiques des zones examinées (p. ex. sur des appuis ou des parois de galeries – où l'on a de fortes projections d'eau à une hauteur comprise entre 0 et 1,5 m, de faibles projections entre 1,5 et 3 m, et des effets de brumisage au-dessus de 3 m –, ces points seront choisis aux cotes 0,1 m, 1,6 m et 3,1 m) puis, avec la teneur en chlorures mesurée à deux profondeurs x déterminantes du béton, (soit x = 15 mm et x = 45 mm, p. ex.), on pourra dresser le profil de répartition des teneurs en chlorures en reliant les deux valeurs de manière linéaire. En lieu et place de carottages, on peut également se servir d'échantillons de poudre de forage (moyenne de groupes de trois) pour établir la teneur en chlorures [3].

Rapportée au poids du ciment, la teneur critique en chlorures (pour la dépassivation) est d'environ 0,4 % [4], bien qu'il faille préciser que la teneur en ciment du béton peut accuser de très fortes variations, notamment dans les couches proches de la surface [3]. Le chiffre approximatif de 0,4 % doit de ce fait encore être relativisé, lorsqu'il est rapporté au poids théorique, respectivement moyen, du ciment.

Pour chaque profil de répartition des chlorures, on détermine la profondeur de béton z qui correspond à une teneur en chlorures équivalant à 0,4 % du poids de ciment. On obtient ainsi la distribution en profondeur des teneurs en chlorures critiques, distribution que l'on peut considérer comme normale.

En partant des paramètres z (profondeur de la teneur critique en chlorures) et c (épaisseur de l'enrobage), on peut, comme pour la dépassivation par carbonatation, calculer la probabilité de dépassivation: celle-ci obéit à nouveau à la condition $z > c$, respectivement $\psi = c - z$.

Sur la base d'expériences personnelles faites lors du relevé de l'état d'ouvrages situés sur la A2 dans le canton d'Uri, il me paraît plus fiable de déterminer la probabilité de dépassivation par carbonatation à partir des profondeurs de carbonatation mesurées et la dépassivation sous l'effet de chlorures par des mesures de potentiel. Lors d'une remise en état d'envergure, la mesure de la probabilité de dépassivation à la fois par les potentiels et des échantillons se justifie en revanche, car des profils de répartition des teneurs en chlorures doivent quoi qu'il en soit être établis pour la remise en état.

Vitesse de corrosion

La vitesse de corrosion dépend principalement du type de corrosion en jeu (uniformément répartie ou locale, respectivement piqûres de corrosion), de la conductibilité électrique du béton (soit en particulier de l'humidité du béton, du microclimat, de la porosité et du type de ciment), ainsi que de la température. Sous l'effet de fluctuations parfois importantes de l'humidité du béton, la vitesse de corrosion s'avère en effet variable. En revanche, pour une évaluation générale de la corrosion à long terme, le rôle de la température peut être considéré comme négligeable. En règle générale, les paramètres relatifs au type de corrosion et à l'humidité du béton en fonction du microclimat suffisent même à évaluer la vitesse de corrosion. Pour des raisons techniques, en effet, une subdivision en zones d'ouvrage relativement restreintes, qui présentent des états de corrosion légèrement différents appelant des mesures de réfection variées, s'avérerait aussi délicate que dispendieuse. En raison des restrictions de trafic et des coûts annexes qu'ils entraînent (installations de chantier, échafaudages, etc.), les travaux de remise en état ne doivent et ne peuvent en effet être exécutés que globalement et à des intervalles de temps relativement importants.

Pour le concepteur, des vitesses de corrosion exprimées selon trois degrés suffisent donc amplement:

- grande vitesse de corrosion pouvant entraîner de graves attaques de corrosion dans un laps de temps compris entre 0 et 15 ans,
- vitesse de corrosion moyenne n'excluant pas de graves attaques de corrosion dans un laps de temps compris entre 15 et 50 ans,
- faible vitesse de corrosion ne débouchant sur de graves attaques de corrosion qu'après 50 ans au plus tôt.

En respectant la contrainte énoncée précédemment, selon laquelle l'importance d'un dégât ne peut être sous-estimée au-delà d'une marge d'erreur de 10 % et surestimée au-delà d'une marge d'environ 30 à 50 %, les vitesses de corrosion peuvent être établies selon les critères suivants:

- la vitesse de corrosion est grande, lorsqu'on ne peut exclure les piqûres; la teneur en chlorures est alors élevée, supérieure à 0,8 % du poids du ciment, dans une zone en contact

avec l'eau ou soumise à de fortes projections;
- la vitesse de corrosion est moyenne, si les piqûres de corrosion peuvent être exclues avec une probabilité d'environ 90 %; la teneur en chlorures est alors faible, dans des zones carbonatées exposées à la pluie ou souvent soumises à une forte humidité ambiante;
- la vitesse de corrosion est faible dans des zones d'ouvrage carbonatées, protégées des intempéries et exposées à une humidité ambiante normale.

Critères complémentaires pour l'évaluation de la corrosion des armatures

Pour établir dans quelle proportion la menace de corrosion, respectivement la probabilité de dépassivation d'une armature demeure admissible, le paramètre clé de la vitesse de corrosion doit encore être complété par d'autres variables, qui sont:
- le degré de sécurité requis
- le diamètre des barres
- la disposition, respectivement la concentration des armatures menacées
- la durée d'utilisation restante admise pour l'ouvrage considéré
- l'aspect des zones d'ouvrage menacées par la corrosion (en particulier l'aspect des fissures ouvertes et des éclats).

A l'heure actuelle, les normes sont encore dépourvues de toute règle contraignante concernant l'évaluation quantitative de la corrosion des armatures. Apparemment, l'opinion qui prévaut toujours est que l'on peut en tout temps – sur la base d'un relevé détaillé de l'état de l'ouvrage et du microclimat –, déterminer, voire pronostiquer exactement la profondeur des attaques de corrosion, pour définir une réduction admissible de la sécurité. C'est pourquoi le concepteur se voit provisoirement réduit à engager sa propre responsabilité en fixant lui-même une probabilité de dépassivation admissible. Si cet examen est mené dans la forme proposée et avec toute la transparence voulue, il sera possible d'indiquer clairement au maître de l'ouvrage ou à son mandant ce à quoi il doit s'attendre, qu'il engage des mesures de remise en état ou pas.

Remise en état par enlèvement puis ajout de béton

Les remises en état par enlèvement de béton de surface carbonaté ou chargé de chlorures, puis remplacement par une couche de béton neuf, constituent des interventions certes coûteuses, mais efficaces et durables. L'enlèvement a lieu par hydrodémolition, et le remplacement par ajout de béton projeté ou coulé. Si l'enlèvement entraîne une certaine perte de substance, cela n'a en principe guère d'influence dans les zones d'armatures (zones tendues), sauf s'il s'agit d'éléments verticaux. Dans ce dernier cas et s'il s'agit d'éléments fortement chargés, le coulage d'un béton armé est en général la solution la plus adaptée pour faire pièce à la perte de substance par enlèvement.

L'ajout de béton doit être effectué avec soin et les armatures mises au jour parfaitement nettoyées. Quant à la liaison entre l'ancien et le nouveau béton, elle doit être garantie par un goujonnage, notamment aux abouts et dans les zones d'introduction des tractions. De fait, l'enlèvement par hydrodémolition laisse une surface de béton d'une rugosité suffisante pour garantir cet effet et le « goujonnage » en question peut être considéré comme « travaillant à la traction » [5]. Lors de l'application du nouveau béton, la surface de l'ancien doit être saturée d'humidité et en cas d'ajout de béton projeté, il importe que le travail soit confié à un spécialiste. Enfin, une cure soignée de la nouvelle couche s'avère indispensable et, une fois durcie, celle-ci doit présenter un module d'élasticité inférieur à celui de l'ancien béton.

En ce qui concerne l'enlèvement du béton dégradé, il est faux de le pousser jusque sous l'armature. Non seulement l'opération est coûteuse, mais une dépassivation locale (très faible écart entre l'anode et la cathode) n'est a priori pas plus probable après qu'avant la remise en état. Au besoin, on attribuera une vitesse de corrosion plus élevée à la zone de dépassivation après la mise en état. En fait, il se peut également que l'épaisseur de l'enrobage dépasse de beaucoup celle figurant sur les plans, si bien que l'armature se trouve déjà profondément enfouie dans un béton « sain ». L'enlèvement du béton sous l'armature entraînerait donc des coûts et des pertes de substance inutiles, sans compter que si elles sont dégagées au-delà d'une certaine longueur, les armatures ne remplissent plus leur fonction.

L'épaisseur de l'enlèvement doit donc être calculée en s'appuyant sur la probabilité de dépassivation obtenue d'après la profondeur de carbonatation ou les profils de répartition des teneurs chlorures.

Calcul de l'épaisseur d'enlèvement x_o pour des bétons carbonatés

Une fois le béton dégradé enlevé jusqu'à la profondeur $x = x_o$ et le nouveau béton ajouté, la courbe de distribution de la profondeur de carbonatation ne vaut plus que pour l'ancien béton demeuré en place. Dans le béton neuf, en effet, la profondeur de carbonatation est (tout d'abord) nulle, si bien que la précédente distribution de la profondeur de carbonatation y (dans la couche enlevée) se trouve entièrement concentrée sur la surface ($x = o$).

Après l'enlèvement du béton dégradé puis l'ajout du matériau neuf, l'armature touche généralement aux deux milieux: le point le plus élevé, respectivement le plus avancé du diamètre de la barre se trouve dans le béton neuf, tandis que le point opposé (soit le plus

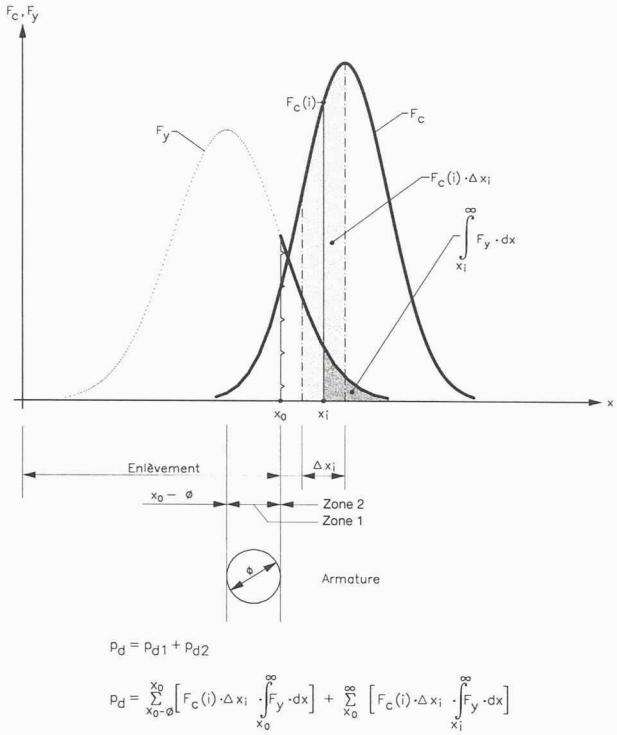


Fig. 4.- Probabilité de dépassivation suite à l'enlèvement d'un béton carbonaté

bas, respectivement le plus reculé) demeure situé dans la couche carbonatée, restée en place, du béton ancien. C'est pourquoi il convient de distinguer deux zones pour calculer la probabilité de dépassivation.

Une *zone 1*, où une partie de l'armature, au plus limitée au point le plus bas de la circonférence de la barre, est entièrement située au dessus du béton ancien carbonaté (le pourtour de l'armature touche / coupe la surface de contact x_o):

$x_o - \phi < c < x_o < y$

Une *zone 2*, où le point de circonférence le plus élevé de la barre est sous la surface de contact x_o (soit entièrement dans le béton ancien):

$x_o < c < y$ (fig. 4)

A partir de là, il est possible de déterminer numériquement la probabilité de dépassivation p_d avec une exactitude (absolument) suffisante, par le biais de deux, au maximum trois segments (correspondant environ au diamètre de l'armature ϕ ou à l'écart type s_c) pris dans l'épaisseur de béton x.

Une éventuelle prise en compte de la recarbonatation du béton ancien par le béton neuf s'avère superflue: son rejaillissement favorable sur la profondeur d'enlèvement nécessaire est en effet négligeable eu égard à la précision d'exécution, respectivement d'enlèvement.

Dans la zone 1, la probabilité de dépassivation est de

$$p_{d1} = \sum_{x_o - \phi}^{x_o} \left[F_c(i) \cdot \Delta x_i \int_{x_o}^{\infty} F_y \cdot dx \right]$$

Dans la *zone 2*, la probabilité de dépassivation est de

$$p_{d2} = \sum_{x_o}^{\infty} \left[F_c(i) \cdot \Delta x_i \int_{x_i}^{\infty} F_y \cdot dx \right]$$

La probabilité totale de dépassivation correspond donc à

$p_d = p_{d1} + p_{d2}$

Calcul de la profondeur d'enlèvement en cas de pénétration de chlorures

Les chlorures sont surtout transportés par l'eau interstitielle. Or, pour autant qu'un élément d'ouvrage ne soit pas continuellement aspergé d'eau salée d'un côté, tandis que le côté opposé sèche (ce qui se produit très rarement et transparaît sur les profils de répartition des teneurs en chlorures), les contaminations salines demeurent pratiquement limitées aux zones de béton proches de la surface, où le taux d'humidité varie (profondeur 5 à 8 cm). Les profils de répartition des chlorures donnent la distribution de la variable z correspondant à la teneur critique de chlorures de 0,4 % du poids de ciment.

Pour la remise en état du tablier, le béton conservé doit être entièrement imprégné d'eau afin de recevoir l'ajout de béton nouveau, tandis que ce dernier doit, à l'inverse, être mis à sec avant la pose de l'étanchéité. Cela a pour conséquence qu'après la pose de l'étanchéité, l'eau interstitielle s'infiltre dans la nouvelle couche de béton, y entraînant des chlorures provenant du béton demeuré en place, ce qui peut se traduire par une modification du profil de répartition des teneurs en chlorures restantes. Dans l'évaluation de la profondeur d'enlèvement, il faudra donc compter avec une migration de la teneur restante en chlorures, ce qui signifie que la probabilité de dépassivation devra toujours être calculée d'après la position de la teneur restante en chlorures la plus défavorable à l'armature (dans l'ancien ou le nouveau béton).

Le phénomène de migration des chlorures de l'ancien vers le nouveau béton ne se produit pas seulement lors de la remise en état du tablier, mais peut aussi toucher d'autres éléments d'ouvrage, dont la surface est (au moins temporairement) complètement mise à sec. Dans la mesure où des déplacements d'eau interstitielle, soit de chlorures, ne peuvent être exclus avec certitude, la sécurité commande donc de tenir compte d'éventuelles teneurs en chlorures migrantes dans tous les éléments d'un ouvrage.

D'abord confinée dans le béton conservé, en dessous de la profondeur d'enlèvement x_o, la part de chlorures restante, doit donc être admise dans la position défavorable x_u pour établir la probabilité d'une dépassivation, et – comme dans le calcul effectué pour la carbonatation – deux zones devront être distinguées:

$x_u - \phi < c < x_u < z$ et

$x_u < c < z$ (fig. 5)

Il s'ensuit (comme pour la carbonatation) que la probabilité de dépassivation devient, dans la zone 1:

$$p_{d1} = \sum_{x_u - \phi}^{x_u} \left[F_c(i) \cdot \Delta x_i \int_{x_u}^{\infty} F_z \cdot dx \right]$$

et dans la *zone 2*

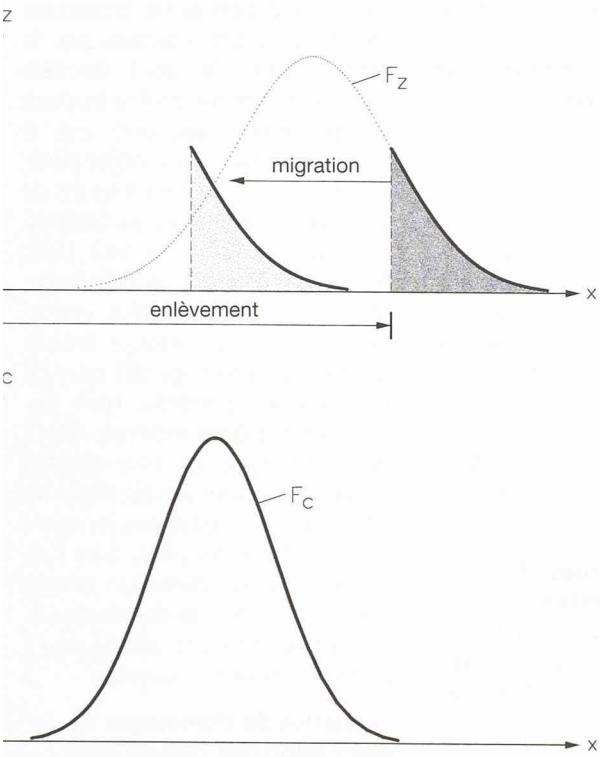
$$p_{d2} = \sum_{x_u}^{\infty} \left[F_c(i) \cdot \Delta x_i \int_{x_i}^{\infty} F_z \cdot dx \right]$$

Quant à la probabilité totale d'une dépassivation elle s'exprime à nouveau par

$pd = p_{d1} + p_{d2}$

Remarques finales

Les recherches qui ont été effectuées ces dernières années sur les caractéristiques techniques des matériaux sont à la fois intéres-



ig. 5.- Migration d'une zone restante infiltrée de chlorures; posi-on défavorable

santes, importantes et précieuses sur le plan scientifique. Sous certains aspects, elles vont toutefois bien au delà des besoins (et de l'expertise) des bâtisseurs. Pour les ingénieurs, les résultats de ces recherches théoriques devraient être convertis en davantage d'acquis applicables à la pratique, tandis qu'on approfondirait moins la connaissance des principes à la base des techniques de mesure.

Dans l'état actuel du savoir, les spécialistes des matériaux seraient, par exemple, parfaitement à même de définir de façon plus exacte et plus complète les bases nécessaires à la détermination des trois principales vitesses de corrosion. En collaboration avec les concepteurs, une probabilité de dépassivation acceptable pourrait ainsi également être fixée dans le sens d'une norme.

Les coûts élevés, et parfois excessifs, liés à la remise en état de nombreux ouvrages ne sauraient être imputés à une connaissance lacunaire des matériaux et de leurs caractéristiques techniques, mais avant tout à des contrôles incomplets des ouvrages, à des applications inadéquates des données scientifiques et techniques disponibles, ainsi qu'à des projets de remise en état insuffisamment aboutis et ne répondant pas aux objectifs visés.

Remerciements

L'auteur remercie M. Heribert Huber, ing. dipl. EPFZ, ingénieur des ponts au Département des travaux publics du canton d'Uri, de son appui lors de la mise en valeur de longues années d'expérience dans le relevé et l'évaluation de l'état des ponts de l'A2 dans son canton, ainsi que lors de leur réparation. Ma reconnaissance va au bureau d'ingénieurs Bänziger+Köppel+Brändli et partenaires, en particulier à M. Karl Baumann, ing. dipl. EPFZ, pour ses indications précieuses, le calcul et la vérification des exemples ainsi que pour les figures illustrant la présente contribution.

Notations

- c Epaisseur de l'enrobage de l'armature
- t Temps
- x Profondeur du béton mesurée à partir de la surface
- x_o Profondeur d'enlèvement
- x_u Profondeur de la zone de contact déplacée x_o
- y Profondeur de carbonatation
- z Profondeur de béton présentant une teneur critique en chlorures (0,4 % du poids de ciment)
- F Fréquence
- F_c Distribution normale de c
- F_y Distribution normale de y
- F_z Distribution normale de z
- ψ Fréquence de la somme de y et c, respectivement de z et c
- p_d Probabilité de dépassivation

Bibliographie

[1] Hunkeler F.: « Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten », EVED, Bundesamt für Strassenbau, VSS-Bericht Nr. 510, 1994

[2] Elsener B., Flückiger D., Wojtas H., Bdhni H.: « Methoden zur Erfassung von Korrosion von Stahl in Beton », EVED, Bundesamt für Strassenbau, VSS-Bericht Nr. 521,1996

[3] Keller T.: « Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken: Transportmechanismen, Auswirkung von Rissen », EVED, Bundesamt für Strassenbau, VSS-Bericht Nr. 235, 1991

[4] Flückiger D., Elsener B., Böhni H.: « Chloride im Beton: Transport und Erfassung » EVED, Bundesamt für Strassenbau, VSS-Bericht Nr. 520, 1996

[5] Brenni P., Keller T, Pellegrinelli L., Menn C.: « Verbindung von altem und neuem Beton », Birkhäuser Verlag Basel, IBK-Bericht Nr. 193, 1992