

# Monitoring après remise en état du béton apparent de l'Ecole d'ingénieurs d'Yverdon

Autor(en): **Rota, Aldo / Flückiger, Dieter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **125 (1999)**

Heft 13/14

PDF erstellt am: **26.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79632>

## **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.

# Monitoring après remise en état du béton apparent de l'Ecole d'ingénieurs d'Yverdon

243

Aldo Rota, Dr. ès sc. techn., ing. matériaux EPF, Dieter Flückiger, Dr. ès sc. techn., ing. civil dipl. EPF, Flückiger + Bosshard AG, Neugasse 10, 8812 Horgen

Présenté dans l'article précédent, le concept de remise en état de façades en béton apparent par application d'inhibiteurs de corrosion constitue une technologie nouvelle, encore insuffisamment testée pour l'instant, des valeurs expérimentales relatives à la durabilité de ses effets face à la corrosion faisant notamment défaut. C'est pourquoi le risque d'une réapparition des dégâts dus à la corrosion au cours de la durée d'utilisation restante de l'ouvrage doit pouvoir être estimé à long terme, grâce au système de monitoring décrit ci-dessous.

La surveillance permanente de l'état de corrosion de l'armature et des paramètres essentiels de la corrosion sur des éléments de façade représentatifs répond aux objectifs suivants:

- assurer l'état des façades: les développements conduisant à une nouvelle corrosion des armatures peuvent être reconnus avant l'apparition de dégâts et des mesures peuvent être prises au moment adéquat;

- acquérir des données expérimentales sur la durabilité des effets de protection des inhibiteurs face à la corrosion dans des conditions d'utilisation réelles: les éléments de façade remis en état constituent un essai en grandeur nature permettant une observation longue et intensive à l'échelle 1:1 des effets de protection face à la corrosion.

Les rares systèmes de monitoring installés en Suisse jusqu'ici, équipent notamment des ouvrages d'art routiers (Pont de l'Europe à Zurich [2], passage supérieur de Haldenstein N13a). Lors de la première application de cette technologie à d'autres types de constructions et plus particulièrement à des éléments de façade préfabriqués, des problèmes spécifiques et des incertitudes sont apparus, généralement en raison des petites dimensions d'éléments de construction isolés, des défaillances, de la faible quantité d'armature et d'un enrobage partiellement insuffisant. Au cours de l'installation et lors de la première phase d'utilisation, les aspects pratiques suivants se sont avérés déterminants: concertation sur la faisabilité, procédé d'exécution, fonctionnement, fia-

bilité et applicabilité des systèmes de monitoring aux façades en béton apparent.

## Principe et concept des mesures

Le principe de mesure repose sur le relevé régulier des paramètres essentiels de la corrosion affectant des barres d'armatures isolées [1,2,3]<sup>1</sup>. Pour une zone de mesure, deux barres d'armature isolées (des premier et deuxième lit) ont été utilisées comme capteurs. Les valeurs électrochimiques suivantes peuvent être mesurées entre ces barres d'armatures isolées et le treillis, de même qu'entre les deux barres à capteurs isolées:

- résistance électrique (résistance de diffusion)

- différence de potentiel

- continuité du courant (puissance électrique).

Les mesures ont été effectuées

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient aux références bibliographiques données en fin d'article.

aussi bien dans des zones soumises à une remise en état du béton (enlèvement et re-profilage), que dans d'autres exemptes d'intervention, ce qui a défini deux procédés de mesure.

## Zones re-profilées

Les zones de re-profilage définies dans le cadre de la remise en état des façades ne prévoyaient pas d'emplacements destinés à l'installation d'éléments de monitoring. Les zones de mesure ont de ce fait été disposées à des endroits présentant une disposition d'armature adéquate, sur des surfaces de re-profilage atteignant 0,25 m<sup>2</sup>. Après l'enlèvement du béton, deux barres d'armature de 100 à 150 mm de long, une horizontale et une verticale, ont été électriquement séparées de l'armature en treillis (fig. 1). Puis, une fois les câbles de mesure raccordés, ces zones ont été re-profilées de la même manière que les autres endroits remis en état et, afin de permettre les mesures électrochimiques, aucune couche de protection anti-corrosion n'a été appliquée sur l'armature.

## Zones non re-profilées

Dans des zones non re-profilées, deux barres d'armature de 100 à 150 mm de long, une verticale et une longitudinale, ont été séparées



Fig. 1. Zones de mesure «re-profilées», avant le re-profilage

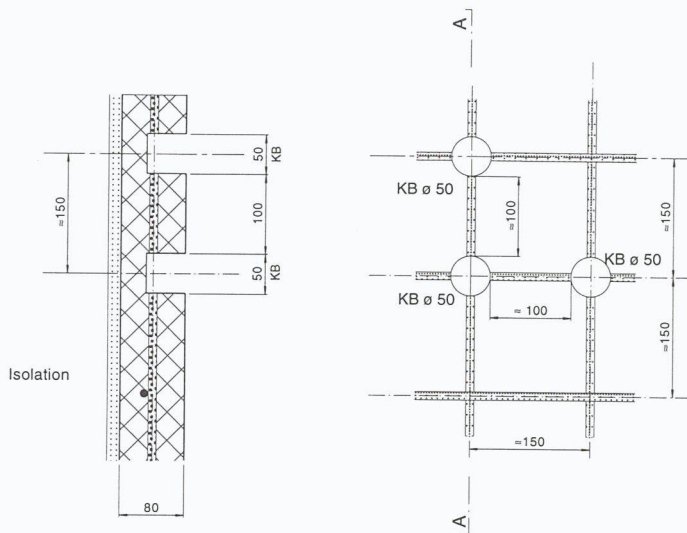


Fig. 2. Représentation schématique des zones de mesure non-reprofilées (KB: forage)

du treillis d'armature par un carottage à trois intersections du lit d'armature extérieur (fig. 2). Après raccordement des câbles de mesure, ces carottages ont été remplis avec un mortier de réparation aux polymères constituant une isolation électrique.

Le faible diamètre des barres (environ 5 mm) appelait une exactitude particulière lors du branchement des câbles de mesure (section: 1 mm<sup>2</sup>). Le contact électrique fut réalisé à l'aide de cosses emmanchées sur le câble par pression et appliquées sur l'armature dans de petits perçages. Dans chaque zone de mesure, un raccordement au treillis d'armature a été réalisé à côté des deux barres d'armature isolées.

Les sept zones de mesure re-profilées ont été équipées de capteurs de température, afin de pouvoir déterminer la température du béton là où l'enrobage est plutôt faible.

Le système de monitoring permet d'obtenir des mesures comparables pour différents groupes de paramètres:

- procédé de remise en état: re-profilage avec application d'inhibiteurs ou application d'inhibiteurs uniquement;
- exposition: façade sud / façade est, hauteur du sol;
- différenciation de l'effet des inhibiteurs: sur deux éléments de façade de l'avant du bâtiment orienté sud-est, deux zones de mesure (respectivement avec et sans re-profilage) ont été déterminées comme surfaces de référence sans inhibiteur sur chacun d'eux.

Un élément de façade comportant généralement une zone re-profilée et une autre qui ne l'est pas, des mesures peuvent donc être effectuées sur toutes les barres d'armature isolées d'un élément de façade, aussi bien entre elles que par rapport à l'armature en treillis.

La prise en compte de tous les paramètres et de l'ensemble des conditions de bord a nécessité l'installation de seize zones de mesure sur dix éléments de façade à différents étages du bâtiment.

Les câbles de mesure ont été posés dans des tubes de protection ouverts en PE courant au dessus des façades et des toits et reliés à des caisses de raccordement situées à l'intérieur du bâtiment. L'architecte a apprécié le fait que le monitoring soit clairement visible par le biais des tuyaux de protection (fig.3).

Mis en service le 2 octobre 1997, soit environ un mois après l'exécution du re-profilage et l'application des inhibiteurs, le monitoring a depuis lors, enregistré les valeurs électrochimiques mesurées tous les 14 ou 28 jours, ainsi que des paramètres météorologiques tels que la température et l'humidité de l'air.

#### Premiers résultats: fonctionnement des zones de mesure

En raison des incertitudes inhérentes aux éléments de construction et d'une installation compliquée par les travaux de remise en état, on pouvait s'attendre à ce que les capteurs ne s'avèrent pas tous fiables. Dans une première étape de l'exploitation des données, il a été possible de déterminer quels cap-

teurs livraient les résultats les plus explicites sur la base des valeurs de résistance enregistrées lors de la première année d'utilisation. La défaillance d'une barre d'armature isolée a pu être attribuée à sa trop faible résistance face à l'armature en treillis (résistance permanente < 1 kW) ou à des interruptions dans le circuit de dérivation. Cela étant, sur les trente-deux barres d'armature isolées qui constituent le système de mesure, les valeurs fournies par vingt-six capteurs ont pu être exploitées.

#### Résistance électrique et différence de potentiel

Les résistances électriques mesurées fluctuent avec l'humidité du béton et la température. Les valeurs obtenues ont donc été corrigées en tenant compte des mesures de température [2,3]. Les valeurs de différence de potentiel inaltérées ont été enregistrées, ces dernières affichant en général moins de dispersions et des tendances plus claires que les mesures de résistances électriques. On trouvera dans [4], certains résultats de mesure avec leur interprétation.

#### Courant de corrosion

Pour le dépouillement de la première phase d'essai, le courant de corrosion  $I$  entre les barres isolées et le treillis d'armature a été mesuré par son intensité en mA et enregistré. Des courants négatifs symbolisent un comportement anodique des barres isolées vis-à-vis du treillis. A côté des mesures directes, les courants de corrosion ont été calculés selon la loi d'Ohm à partir de

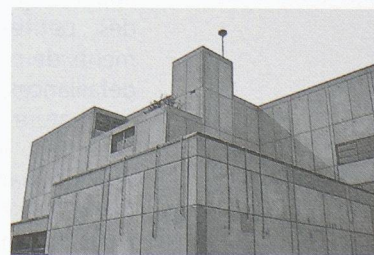


Fig. 3. Tuyaux de protection pour les câbles de l'annexe sud-est (niveau F) (Photo: E. de Lainsecq, Yvorne)

la résistance de diffusion (qui dépend de la température) et de la différence de potentiel mesurées. Pour toutes les zones de mesures, le calcul des valeurs absolues des courants a livré des résultats de 10 à 25 % supérieurs à ceux obtenus par mesures directes [4]. Au cours de la première phase d'utilisation, les courants de corrosion relatifs aux différents types de zones de mesures se sont développés en fonction des tendances suivantes:

- sur les re-profilages avec application d'inhibiteurs: augmentation du courant de corrosion (absolu) au début, obtention d'un maximum dépassant presque 200 mA après environ 350 ± 50 jours, avec ensuite une baisse progressive, pour environ 75 % des capteurs; les valeurs actuelles varient entre 10 et 50 mA, les 25 % restants indiquant des courants nettement plus élevés en atteignant 100 à 200 mA;

- dans les zones non re-profilées avec application d'inhibiteurs: baisse régulière du courant de corrosion (absolu) partant de valeurs de départ de l'ordre de 100 à 200 mA jusqu'aux valeurs actuelles inférieures à 50 mA;

- sur les re-profilages sans application d'inhibiteurs: comportement similaire à des zones re-profilées avec application d'inhibiteurs; valeurs relativement élevées du courant: de l'ordre de 100 à 200 mA.

- dans les zones non re-profilées sans application d'inhibiteurs: valeurs à peu près constantes; faible courant de corrosion < 20 mA.

Sur une barre à capteurs isolée de 10 cm de long, un courant de corrosion de 10 mA représente, pour une corrosion uniforme, une perte de section de 7,5 mm/an [1]. Cette valeur correspond à celle de la densité de courant passive (perte de section < 1 mm/an) et son influence peut être considérée comme négligeable sur la durabilité. Les plus grandes valeurs instantanées se situaient aux alentours de 400 mA, ce qui correspondrait, pour une conduction de courant permanente, à une perte moyenne de

300 mm/an. Si l'on tolère une perte moyenne maximale de 1 mm sur une durée d'utilisation restante de cinquante ans, le courant de corrosion doit alors toujours demeurer sous la valeur de 25 mA. Actuellement, pour environ 75 % des zones re-profilées traitées aux inhibiteurs, ainsi que pour la grande majorité des zones non re-profilées (avec ou sans inhibiteurs), les courants de corrosion se situent en dessous ou aux alentours de cette valeur limite (hypothétique). A contrario, les courants de corrosion des zones re-profilées sans inhibiteurs (et pour 25 % avec traitement aux inhibiteurs) se sont avérés nettement plus élevés, les tendances pour les six derniers mois indiquant une baisse des valeurs.

#### Première évaluation

- La mise en place d'un système de monitoring sur des éléments préfabriqués de façade en béton apparent est faisable moyennant une dépense raisonnable. Les zones de mesure choisies sont pour la plupart intactes et aptes à assurer la surveillance à long terme.

- Les petites dimensions, la disposition irrégulière des armatures et le faible enrobage compliquent l'instrumentation de même que l'exploitation et l'interprétation des résultats.

- Dans les zones re-profilées sans traitement aux inhibiteurs, les valeurs mesurées de la première phase d'utilisation renseignent sur le séchage du béton/mortier et sur la mise au point de l'équilibre électrochimique aux armatures. Aux endroits non traités, sans re-profilage, aucune variation importante des paramètres électrochimiques n'a été relevée.

- Le développement de la résistance de diffusion dans les zones (avec ou sans re-profilage) traitées aux inhibiteurs ne peut pas être due uniquement aux effets de séchage ou aux influences météorologiques. Après une phase initiale de séchage, l'inhibiteur de corrosion présente une baisse notable de la ré-

sistance de diffusion. La suite de la série de mesures montrera s'il s'agit d'un effet initial singulier ou si les résistances de diffusion peuvent être influencées durablement par les inhibiteurs de corrosion.

- Les premiers résultats indiquent que dans la plupart des cas, l'inhibiteur de corrosion utilisé réduisait de manière significative le courant de corrosion dans les zones re-profilées par rapport aux zones non re-profilées. Dans la pratique, pour répondre à la question déterminante concernant la durabilité de l'effet de ces inhibiteurs, il faut attendre la suite des mesures sur plusieurs années.

Les mesures présentées et les tendances qui en découlent concernent uniquement le comportement du système pendant la première phase d'utilisation de la façade remise en état, où l'on relève essentiellement les processus de séchage et d'hydratation. Des conclusions fiables relatives au comportement à long terme ne pourront être tirées qu'après une durée de mesure de plusieurs années. En particulier, les relations entre les conditions climatiques et les paramètres électrochimiques devront être établies sur la base d'un nombre important de valeurs statistiques, afin de pouvoir différencier l'effet des inhibiteurs des actions extérieures. □

#### Références bibliographiques

- [1] ELSENER, B.; FLÜCKIGER, D.; WOJTAS, H. ET BÖHNI, H.: «Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton», EVED/ASB, Rapport VSS No 521, Berne, février 1996
- [2] BINDSCHEDLER, D. ET HUNKELER, F.: «Europabrücke: Korrosionsuntersuchungen», *Schweizer Ingenieur und Architekt* 19/1997, pp. 374-378
- [3] HUNKELER, F.: «Elektrischer Betonwiderstand», *Schweizer Ingenieur und Architekt* 5/1997, pp. 82-88
- [4] ROTA, A. ET FLÜCKIGER, D.: «Monitoring nach der Sichtbetoninstandsetzung mit Inhibitoren – Ingenieur-Schule Yverdon», *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 26/1999, pp. 10-14