

# Remise en état d'ouvrages en béton armé (2) : mesures de potentiel

Autor(en): **Hermann, Kurt / Hunkeler, Fritz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin du ciment**

Band (Jahr): **66 (1998)**

Heft 9

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-146459>

## **Nutzungsbedingungen**

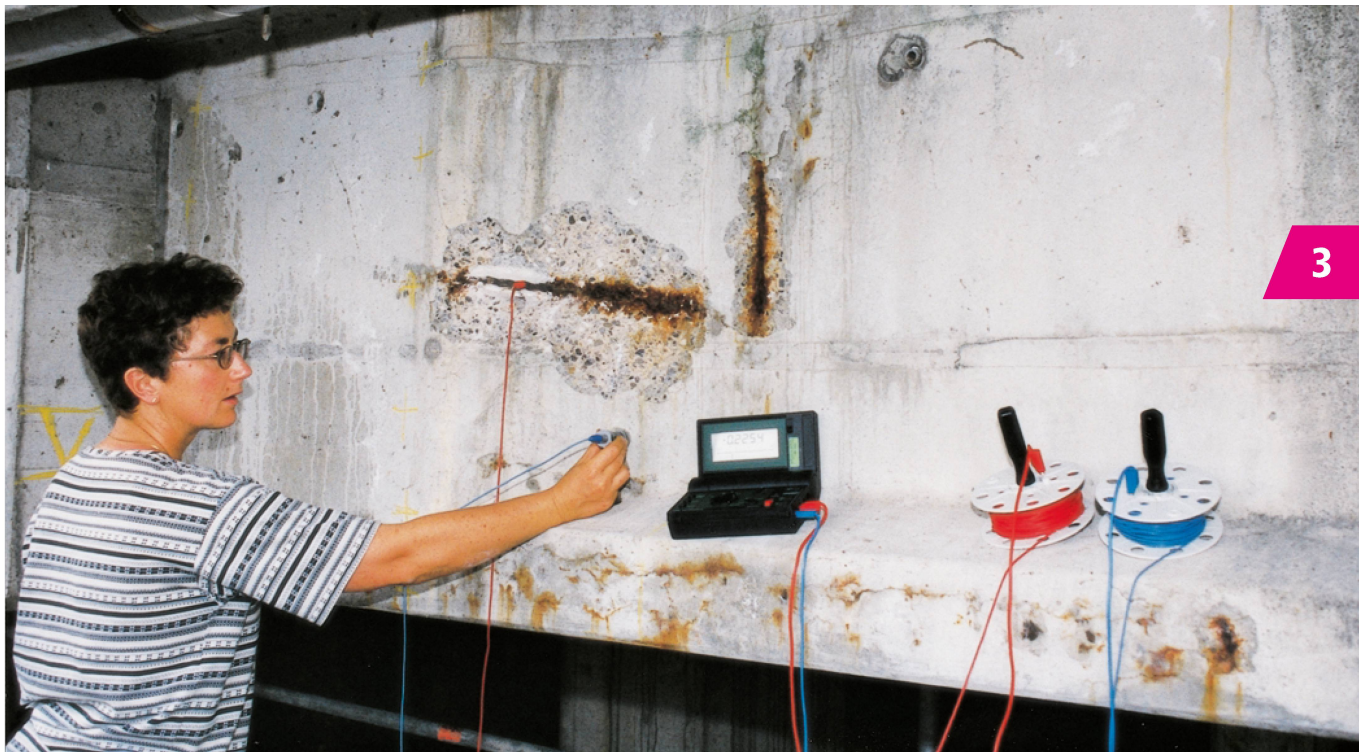
Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

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.



Mesure de potentiel sur la face inférieure d'un pont.

Photo: Tobias Jakob, TFB

## Remise en état d'ouvrages en béton armé (2): mesures de potentiel

**Combinées avec d'autres méthodes d'examen, les mesures de potentiel sur des éléments de construction en béton armé permettent d'obtenir des informations fiables sur l'état de corrosion de l'armature.**

Parmi les méthodes pour détecter l'état de corrosion de l'acier dans le béton, la mesure de potentiel fait ses preuves depuis longtemps: introduite d'abord aux USA, elle est utilisée en Suisse depuis 1985 environ. Le savoir-faire ainsi acquis a fait l'objet de diverses publications. Une bonne vue d'ensemble de l'état actuel des connaissances en la matière est donnée par:

- Cahier technique SIA 2006: «Durchführung und Interpretation von Potentialmessungen an Stahlbetonbauten» (édition février 1993) [1]

- Hunkeler, F., «Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten», rapport VSS no 510, mai 1994 [2]
- Documentation SIA D 0126: «Potentialmessung, ein wesentliches Instrument für die Beurteilung von Bauwerken» (1995) [3]

Le présent article est basé en majeure partie sur les documents établis pour un séminaire du TFB à Wildegg [4].

### Procédé simple

Les mesures de potentiel complètent les méthodes et procédés usuels pour le relevé de l'état des ouvrages. L'utilisation de cette méthode d'examen presque totalement non destructive est judicieuse dans les domaines suivants:

- informations couvrant toute la surface sur
  - l'emplacement et les dimensions des foyers de corrosion
  - l'état de corrosion de l'armature
  - la contamination du béton par les chlorures
  - la carbonatation du béton
  - la répartition de l'humidité dans un élément de construction (p. ex. sous les couches d'étanchéité)

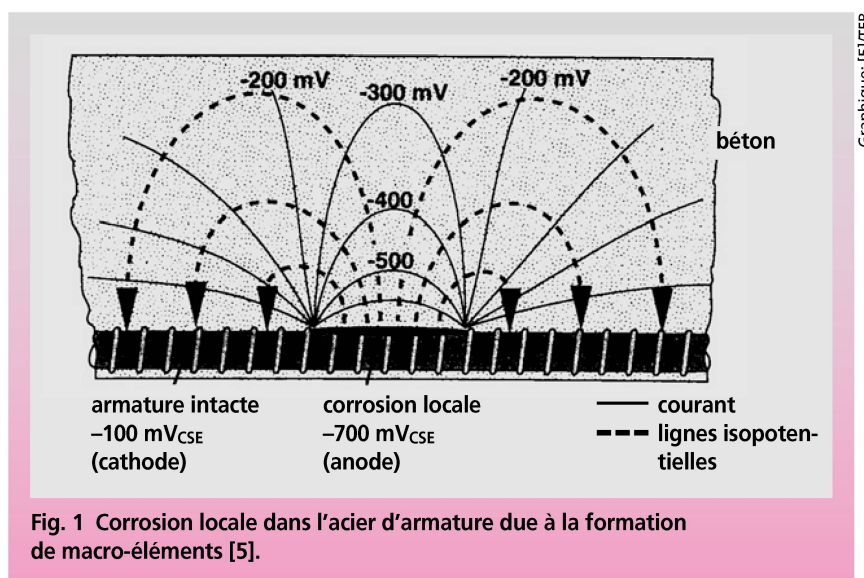


Fig. 1 Corrosion locale dans l'acier d'armature due à la formation de macro-éléments [5].

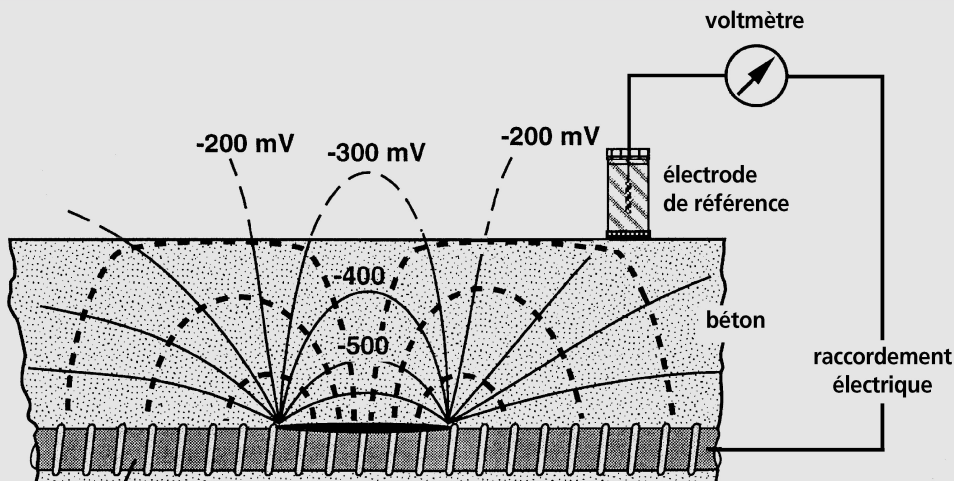


Fig. 2 Principe de la mesure de potentiel sur la surface du béton [5].

Graphique: [5]/TFB

- fourniture de données de base pour déterminer l'ampleur des mesures de conservation et de renouvellement
  - contrôle du succès des mesures de conservation et de renouvellement
- L'état de corrosion de l'armature est toujours ce qui est le plus important. Avec les instruments actuellement à disposition, il est relativement facile de procéder à des mesures de potentiel. Mais effectuer correctement les examens, et savoir bien évaluer et interpréter les résultats des mesures est beaucoup plus difficile. Des connaissances approfondies des bases électrochimiques de la corrosion de l'acier et du comportement physico-chimique du béton sont par exemple indispensables.

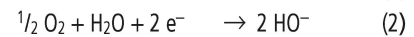
### Corrosion de l'acier dans le béton

Dans le béton, l'acier est en principe protégé contre la corrosion, car sous l'action de l'eau interstitielle fortement alcaline (pH 12,5 à 13,5), il se forme spontanément sur sa surface une mince couche protectrice continue adhérent solidement. Toutefois, en présence de ions de chlorure ou en cas de valeurs  $\text{pH} \leq 11,5$  (abaissement du pH dû à la carbonatation), cette couche passive n'est plus stable; mais ce n'est qu'avec la présence simultanée d'eau et d'oxygène qu'il y a risque de corrosion pour l'armature.

La corrosion de l'acier d'armature (figure 1) est un processus électrochimique complexe. Un endroit avec couche passive détruite agit en tant qu'anode locale, et la zone superficielle non corrodée l'entourant, en tant que cathode; ensemble, ils forment un élément galvanique court-circuité, soit un macro-élément.

Pendant le processus électrochimique sur l'anode (1), des ions de fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ) se détachent de l'édifice réticulaire du fer. Sous l'action de la différence

de potentiel en train de se constituer, les électrons ( $e^-$ ) libérés migrent vers la cathode. C'est là qu'a lieu le processus cathodique élémentaire (2).



Pour fermer le circuit, il faut également un électrolyte, dans lequel les ions formés peuvent se dissoudre et être transportés. Dans le béton armé, c'est la solution contenue dans les pores du béton qui en fait office. Les ions hydroxyle ( $\text{HO}^-$ ) qui se sont for-

#### Influences principales

- état de corrosion de l'armature
- teneur en chlorures du béton
- humidité et résistance du béton
- profondeur de carbonatation du béton (valeur pH de l'eau interstitielle)
- teneur en oxygène du béton
- macro-éléments

#### Influences secondaires

- température
- propriétés du béton
- âge du béton
- couche d'enrobage et disposition de l'armature
- fissures et joints
- armature pas complètement enrobée

Tab. 1 Influences principales et secondaires sur le potentiel de corrosion de l'armature [1].

Tab. 2 Potentiels de corrosion de métaux dans le béton [1, 4].

Electrode	Potentiel [V <sub>CSE</sub> ]
Acier d'armature dans	
- solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturée	$\geq -1,1$
- béton saturé d'eau, exempt de $\text{O}_2$	$\geq -1,1$
- béton normalement humide, contenant des chlorures	$\geq -0,6$
- béton normalement humide, exempt de chlorures	+0,1 à -0,1
- béton normalement humide, carbonaté	+0,1 à -0,3
- béton sec, carbonaté	+0,2 à 0
- béton sec	+0,2 à 0
Acier inoxydable dans	
- béton normalement humide	+0,1 à -0,2
Cuivre dans	
- béton normalement humide	+0,1 à -0,2
Acier galvanisé dans	
- béton mouillé	$\geq -1,1$
- béton normalement humide, contenant des chlorures	$\geq -0,8$
- béton normalement humide, exempt de chlorures	pareil à acier d'armature
- béton normalement humide, carbonaté	+0,2 à -0,1
- béton sec, carbonaté	pareil à acier d'armature
- béton sec	pareil à acier d'armature



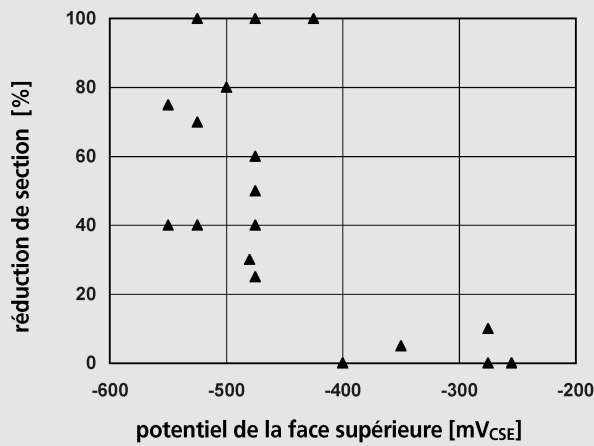


Fig. 3 Rapport entre la réduction de section de l'armature et le potentiel [4].

Graphique: TFBZSD

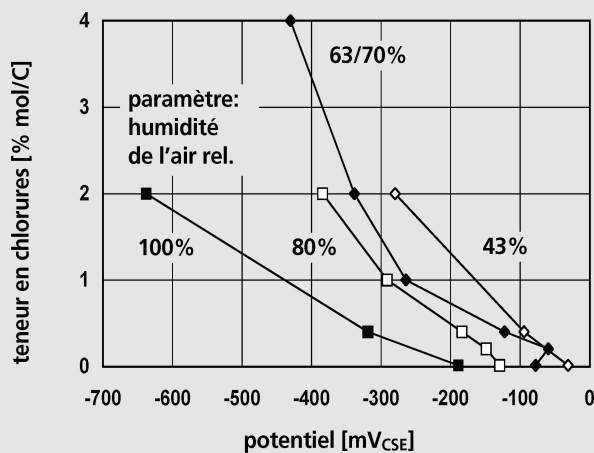
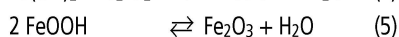
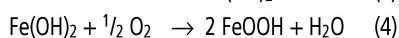
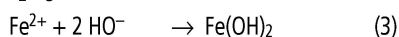


Fig. 4 Influence de la teneur en chlorures et de l'humidité de l'air et du béton sur le potentiel de corrosion [4].

Graphique: TFBZSD

més au cours du processus cathodique élémentaire (2) migrent vers l'anode et rencontrent les ions fer; il se forme de l'hydroxyde ferrique, que l'oxygène transforme en rouille, soit en un mélange de FeOOH et de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:



Les endroits de l'armature corrodés et les endroits non corrodés (passifs) ont des potentiels qui diffèrent de plusieurs 100 mV. Le courant qui en résulte est couplé à un champ électrique (voir figure 1), lequel peut être mesuré sur la surface du béton comme représenté schématiquement à la figure 2.

Comme électrodes de référence, on utilise généralement des électrodes à cuivre-sulfate de cuivre (CSE), dont le potentiel standard V<sub>NHE</sub> est de +318 mV à 25 °C. (Le potentiel standard de l'électrode à hydrogène [SHE ou NHE] est conformément à la défi-

nition de 0,000 mV à 25 °C.) Lors de mesures avec l'électrode à cuivre-sulfate de cuivre, les valeurs V<sub>CSE</sub> sont lues, et également utilisées dans l'interprétation.

### Potentiels de corrosion de l'acier

Les influences principales et secondaires exercées sur les potentiels de corrosion de l'acier des armatures figurent dans le tableau 1. Lors des mesures, il faut en outre tenir compte des influences perturbatrices tels qu'enduits sur la surface du béton ou courants vagabonds, ainsi que des erreurs de mesure, qui peuvent être dues par exemple à des câbles défectueux (voir annexe II dans [1]). Les gammes des potentiels pour l'acier d'armature en diverses conditions ambiantes sont indiquées dans le tableau 2. Les principales influences favorisant la corrosion sont expliquées brièvement ci-après au moyen d'exemples concrets.

**Etat de corrosion de l'armature**  
Plus la vitesse de corrosion, et donc la réduction de section de l'armature, sont élevées dans la zone corrodée, plus le potentiel de corrosion est bas (figure 3).

### Degré d'humidité et teneur en chlorures du béton

Le potentiel de corrosion diminue parallèlement à l'augmentation de la teneur en chlorures du béton. Mais l'humidité du béton, qui plus elle est élevée, plus elle renforce l'influence des chlorures, joue également un rôle (figure 4).

### Degré de carbonatation du béton

Plus la carbonatation du béton est forte, plus la valeur pH de la solution contenue dans les pores est basse. Lorsque la valeur pH baisse, le potentiel de l'acier d'armature commence par augmenter, pour ensuite diminuer.

### Mesures de potentiel in situ

Pour les mesures de potentiel, on a besoin pour l'essentiel de l'équipement suivant:

- raccordement à l'armature
  - électrode de référence (généralement électrode à cuivre-sulfate de cuivre, CSE)
  - voltmètre à haute résistance
  - câble en cuivre isolé
- Entre 0 et 50 °C, les électrodes à



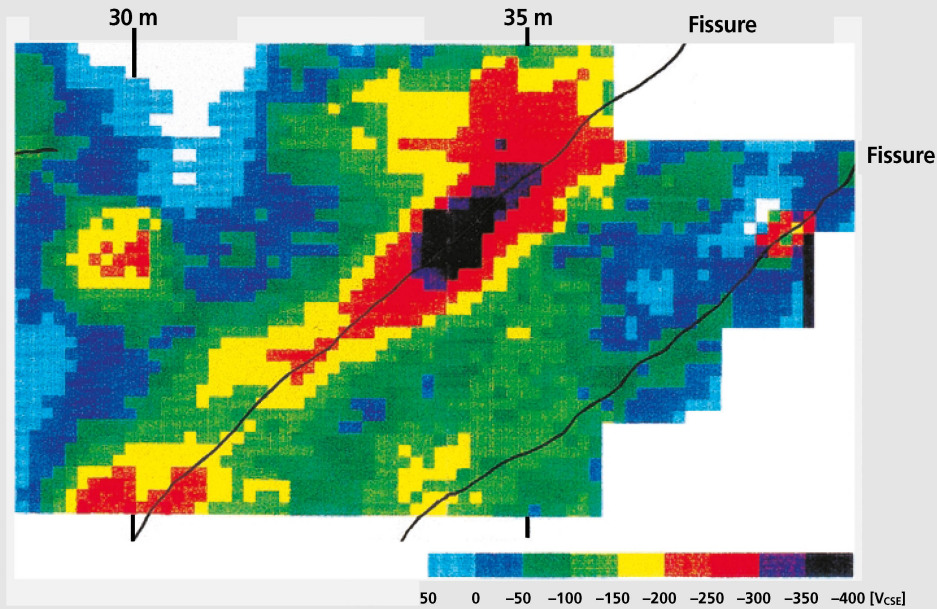


Fig. 5 Champ de potentiel de la dalle fissurée d'un parking avec forte corrosion dans les zones fissurées.

Graphique: SGK, TFBZSD

cuivre-sulfate de cuivre ont des coefficients de température relativement bas d'environ  $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ .

Il faut en principe distinguer entre mesures de points de potentiel et mesures de champs de potentiel. Les *mesures de points de potentiel* s'effectuent avec des électrodes individuelles. La grille de mesure usuelle est de  $0,5 \times 0,5$  à  $1,0 \times 2,0 \text{ m}$ , dont résultent  $0,1$  à  $25$  points de mesure/ $\text{m}^2$ . Les *mesures de champs de potentiel* sont effectuées avec des systèmes à plusieurs électrodes. La grille de

mesure à mailles serrées ( $0,15 \times 0,15$  à  $0,50 \times 0,50 \text{ m}$ ) fournit des points de mesure en nombre proportionnel ( $4$  à  $45/\text{m}^2$ ). Cela permet – coûteusement toutefois – la représentation de champs de potentiel (figure 5). La mesure de points de potentiel universellement utilisée suffit généralement pour décrire avec assez de précision sur la surface du béton le développement du potentiel. Il ne sera pas traité ici de l'exécution des mesures. Il en est traité en détail dans le cahier technique SIA 2006 [1].

dalle de chaussée du tunnel du San Bernardino [4].

La distribution de fréquence des potentiels (groupes de grandeur de  $10 \text{ mV}$ ) donne l'image représentée à la figure 6a. Elle ne permet pas de déterminer à partir de quel potentiel il faut s'attendre à la corrosion. On trouve déjà davantage d'informations dans la figure 6b, avec la représentation de la fréquence cumulée des potentiels.

Mais ce n'est que par la représentation de la fréquence cumulée en coordonnées à échelle fonctionnelle qu'il est possible de clairement attribuer les valeurs de potentiel à différentes zones (figure 6c). Graphiquement, on peut définir trois droites (tangentes), dont les points d'intersection  $U(K)$  et  $U(P)$  délimitent trois zones:

- $U(K)$  est le point d'intersection entre les droites pour la zone de la corrosion et la tangente pour la zone de transition;  $U \leq U(K)$  signifie corrosion (probabilité de 100 %).
- $U(P)$  est le point d'intersection entre les droites pour la zone de l'armature passive et la tangente pour la zone de transition;  $U \geq U(P)$  signifie avec 100 % de probabilité pas de corrosion.
- Dans la zone entre  $U(P)$  et  $U(K)$ , la probabilité de corrosion se situe entre 0 et 100 %, la probabilité

## Bibliographie

- [1] Cahier technique SIA 2006: «Durchführung und Interpretation von Potentialmessungen an Stahlbetonbauten» (édition février 1993).
- [2] Hunkeler, F., «Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten», rapport VSS no 510, mai 1994.
- [3] Documentation SIA D 0126: «Potentialmessung, ein wesentliches Instrument für die Beurteilung von Bauwerken» (1995).
- [4] Hunkeler, F., «Zustandserfassung mittels Potentialmessung» dans documents pour le séminaire TFB «Instandsetzung von Stahlbetonbauten: Zustandserfassung» du 3 mars 1998 à Wildegg.
- [5] Elsener, B., Flückiger, D., Wojtas, H., und Böhni, H., «Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton», rapport VSS no 521, février 1996.
- [6] Hermann, K., «Protection cathodique contre la corrosion», Bulletin du ciment 61 [20], 1–9 (1993).

## Interprétation des mesures de potentiel

Le mieux est de réunir les mesures de points et les mesures avec électrodes à roue sous forme de tableaux. Pour déterminer quelles sont les zones menacées par la corrosion, on procède ensuite par dépouillement statistique en trois étapes. Sont calculés et représentés en tant que fonction du potentiel:

- distribution de fréquence (figure 6a)
- fréquence cumulée (figure 6b)
- distribution de fréquence cumulée en coordonnées à échelle fonctionnelle (figure 6c)

La façon de procéder est illustrée ci-après de façon très simplifiée au moyen des mesures de potentiel effectuées sur la face inférieure de la

étant d'environ 50 % à  $U(\bar{u})$  (point d'inflexion de la courbe de fréquence cumulée).  
Il en résulte pour notre exemple (voir figure 6c)

- presque 100 % de probabilité de corrosion ( $U \leq -420 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ ) à environ 9,5 % des points de mesure
- presque 100 % de probabilité pour une armature à l'état passif ( $U \geq -50 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ ) à environ 38 % des points de mesure

Les valeurs de potentiel critiques dépendent très fortement des grandeurs d'influence déjà mentionnées; c'est pourquoi elles doivent être déterminées pour chaque élément de construction.

### Autres examens

Dans la plupart des cas, la délimitation des zones avec armature corrodée ou probablement corrodée ne suffit pas pour obtenir des informations fiables sur l'état de corrosion d'un élément de construction. Il faut le plus souvent procéder à d'autres examens, afin de pouvoir établir des corrélations entre d'une part les valeurs de potentiel, et d'autre part la teneur en chlorures, la profondeur de carbonatation, l'enrobage de l'armature et la réduction de section de l'armature. Les points de prélèvement et les ouvertures de sondage nécessaires sont naturellement soigneusement choisis sur la

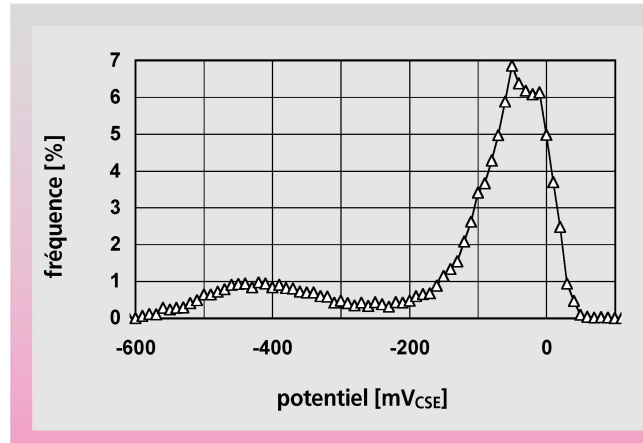


Fig. 6a Distribution de fréquence des valeurs de potentiel de la face inférieure de la dalle de chaussée du tunnel du San Bernardino [2].

Graphique: TFB/ZSD

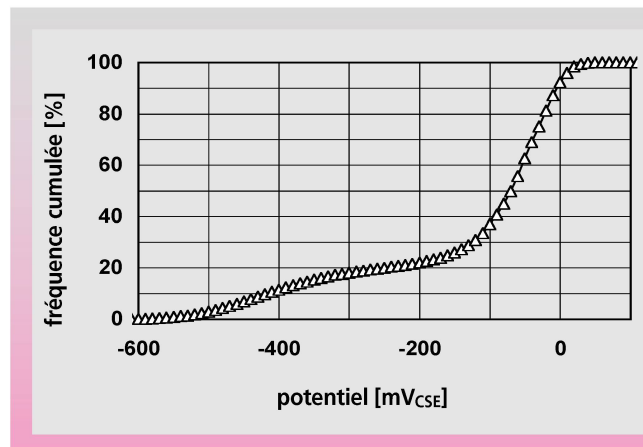


Fig. 6b Fréquence cumulée des valeurs de potentiel de la face inférieure de la dalle de chaussée du tunnel du San Bernardino [2].

Graphique: TFB/ZSD

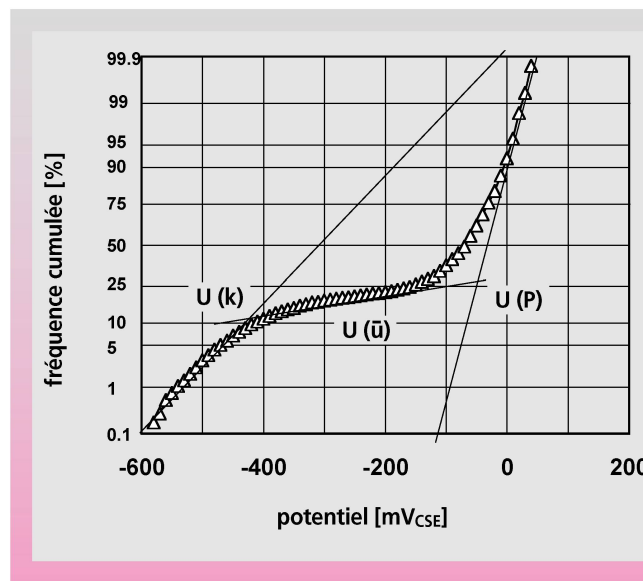


Fig. 6c Fréquence cumulée des valeurs de potentiel de la dalle de chaussée du tunnel du San Bernardino en coordonnées à échelle fonctionnelle [2].

Graphique: TFB/ZSD

base des résultats des mesures de potentiel. Des ingénieurs expérimentés peuvent déduire de ces données des valeurs de potentiel limites pour des zones sans corrosion et des zones avec

forte corrosion ou corrosion perforante; la zone de transition, avec début de corrosion ou légère corrosion, se situe entre les deux. Kurt Hermann et Fritz Hunkeler, TFB