

Conception, exécution et interprétation de la mesure de potentiel sur des ouvrages en béton armé

**schweizerischer
ingenieur- und
architektenverein**

**société suisse
des ingénieurs
et des architectes**

**società svizzera
degli ingegneri
e degli architetti**

**swiss society
of engineers
and architects**

**selnaustrasse 16
postfach
ch-8027 zürich
www.sia.ch**

Cahiers techniques SIA

Les cahiers techniques sont publiés par la SIA en tant que règlements complémentaires et commentaires dans des domaines spécifiques.

Les cahiers techniques font partie intégrante des normes SIA.

Les cahiers techniques sont valables trois ans à partir de leur parution. Leur validité est renouvelable par période de trois ans.

Les corrections et commentaires éventuels concernant la présente publication sont disponibles sous www.sia.ch/correctif.

La SIA décline toute responsabilité en cas de dommages qui pourraient survenir du fait de l'utilisation ou de l'application de la présente publication.

TABLE DES MATIÈRES

	Page		Page
Avant-propos	4	Annexe	
0 Domaine d'application	5	Annexe A Facteurs d'influence et sources d'erreur (informative)	20
0.1 Délimitation	5	Annexe B Equipement et exigences à l'équipement (normative)	24
0.2 Références	5	Annexe C Procédure pour les sondages (normative)	26
0.3 Dérogations	5	Annexe D Détermination du degré de corrosion (normative)	30
1 Bases de compréhension	6	Annexe E Indications par rapport à la soumission (informative)	32
1.1 Mesure de potentiel	6	Annexe F Littérature (informative)	36
1.2 Types de mesure de potentiel	7		
1.3 Objectifs et application de la mesure de potentiel	7		
1.4 Limites de la mesure de potentiel	8		
1.5 Terminologie	8		
2 Exigences aux spécialistes impliqués ..	10		
3 Conception, préparation et exécution de la mesure de potentiel	11		
3.1 Généralités	11		
3.2 Conception et préparation	11		
3.3 Travaux préparatoires avant la mesure	12		
3.4 Réalisation de la mesure de potentiel ..	13		
3.5 Investigations complémentaires destinées à l'interprétation de la mesure de potentiel	13		
3.6 Sondages	13		
4 Evaluation et interprétation	15		
4.1 Généralités	15		
4.2 Représentation	15		
4.3 Analyse statistique	15		
4.4 Investigations complémentaires	16		
4.5 Interprétation	17		
4.6 Evaluation de l'état de corrosion de l'armature et de l'évolution de l'état	17		
5 Rapport	19		
5.1 But	19		
5.2 Contenu (réalisation)	19		
5.3 Contenu (évaluation)	19		
5.4 Dossier de l'ouvrage	19		

AVANT-PROPOS

La mesure de potentiel est aujourd’hui d’une grande importance technique et économique dans le cadre des relevés d’état et de la réfection des ouvrages en béton armé. Les résultats de la mesure de potentiel constituent la base pour décider des mesures de réfection nécessaires. La conception, l’exécution, l’évaluation et surtout l’interprétation des mesures de potentiel doivent être réalisées soigneusement et de manière spécifique pour l’objet investigué par un spécialiste pouvant justifier des connaissances solides des phénomènes fondamentaux.

Le cahier technique SIA 2006 est un complément à la norme SIA 269/2 «Maintenance des structures porteuses – Structures en béton» et établit les bases pour la conception, l’exécution et surtout l’interprétation des mesures de potentiel. Il ne s’agit pas d’un mode d’emploi tout complet.

Le cahier technique SIA 2006 s’adresse en premier lieu aux prestataires de service (bureaux d’ingénieurs spécialisés, laboratoires d’essai), mais sert aussi de source d’information et de référence pour les mandants et pour la mise en soumission (maîtres d’ouvrage, ingénieurs).

Le cahier technique SIA 2006 a été publié pour la première fois en février 1993 et depuis prolongé à plusieurs reprises de chaque fois 3 ans (la dernière fois en 2009). Depuis la première publication, des nouvelles connaissances et des nombreuses expériences ont été réalisées. La mise à jour du cahier technique s’appuie sur ces nouvelles données.

Des méthodes d’investigations non destructives qui peuvent aussi être appliquées sur des grandes surfaces constituent un outil précieux pour l’évaluation de l’état d’ouvrage et la conception de l’intervention de remise en état. Puisque la plupart des détériorations sur les éléments en béton armé est principalement due au phénomène de corrosion dans le béton de l’armature, les mesures de potentiel ont acquis une grande importance et sont aujourd’hui utilisées à large échelle. En combinaison avec d’autres méthodes et étalonnées de manière ciblée, elles permettent d’évaluer de manière fiable le risque et l’état de corrosion de l’armature, mais pas la vitesse de corrosion. En outre, la mesure de potentiel peut fournir des renseignements qualitatifs par rapport à l’état d’humidité dans l’élément d’ouvrage, à la contamination en chlorures et à la carbonatation du béton. Les mesures de potentiel sont également utilisées dans le cadre de la surveillance et du contrôle de la qualité d’une intervention de remise en état effectuée.

Le premier objectif du cahier technique est d’établir un cadre permettant d’assurer un standard de qualité minimal et comparable entre les différents prestataires de service pour la conception, l’exécution, l’évaluation et l’interprétation des mesures de potentiel. En outre, pour les maîtres d’ouvrage ce cahier met en évidence les opportunités et limites de l’application de la méthode et permet de situer correctement et d’apprécier à leur juste valeur les résultats de mesures lors de l’évaluation globale des ouvrages. Enfin, le cahier vise à uniformiser la terminologie.

On se référera à la littérature donnée en annexe F pour une étude plus approfondie du phénomène de corrosion et des processus électrochimiques dans le béton armé.

Groupe de travail SIA 262 *Cahier technique SIA 2006*

0 DOMAINE D'APPLICATION

0.1 Délimitation

- 0.1.1 Le cahier technique est un complément à la norme SIA 269/2 et fournit des indications par rapport aux possibilités d'application des mesures de potentiel dans le cadre de la maintenance des structures porteuses.
- 0.1.2 Le cahier technique régit la conception, l'exécution, l'évaluation et l'interprétation des mesures de potentiel pour la détermination de l'état de corrosion de l'armature passive dans des éléments d'ouvrage en béton armé. Il établit aussi des préconisations relatives à l'ouverture des fenêtres de sondage ainsi qu'au contenu du rapport.
- 0.1.3 Le cahier technique se limite à la mesure de potentiel avec une ou plusieurs électrodes de référence mobiles et un raccordement à l'armature. Des mesures avec deux électrodes de référence sans raccordement à l'armature ne sont pas abordées.
- 0.1.4 Les mesures de potentiel peuvent être appliquées sur des éléments d'ouvrage en béton précontraint (fils adhérents) pour relever l'état de corrosion des fils de précontrainte. Or ceci requiert des connaissances particulières et une approche très soigneuse.
- 0.1.5 Dans le cas des systèmes de précontrainte avec posttension et gaines métalliques, les mesures de potentiel peuvent fournir des informations concernant l'état de corrosion de la gaine, mais pas, ou seulement de manière limitée, l'état de corrosion de l'acier de précontrainte (fils, torons). Dans ce cas, les compétences d'un ingénieur spécialisé sont nécessaires.
- 0.1.6 Les mesures de potentiel sur des éléments d'ouvrage immergés dans de l'eau sont en principe réalisables, mais posent des exigences plus élevées en matière d'équipement de mesure et requièrent des connaissances particulières. Elles ne sont pas abordées dans ce cahier technique.
- 0.1.7 La mesure en continu des potentiels de corrosion dans le cadre d'un projet de monitorage n'est pas traitée dans ce cahier technique. Ce type d'application doit être réglé au cas par cas.

0.2 Références

- 0.2.1 Les normes et directives citées ci-après s'appliquent en tout ou partie dans le sens du renvoi:

SIA 269:2011	Bases pour la maintenance des structures porteuses
SIA 269/2:2011	Maintenance des structures porteuses – Structures en béton
SN EN 14629:2007	Mesurage du taux de chlorure d'un béton durci
SN EN 14630:2006	Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton durci par la méthode à la phénolphtaléine
VSV-ASEP:2007	Recommandations pour l'ouverture et la remise en état des sondages sur des unités de précontrainte

0.3 Dérogations

- 0.3.1 Des dérogations au présent cahier technique sont admissibles, si elles sont suffisamment justifiées par la théorie ou par des essais, ou si de nouveaux développements ou de nouvelles connaissances dans le domaine en question permettent une telle démarche.
- 0.3.2 Des dérogations au présent cahier technique sont à documenter de manière claire et justifiée dans les notes de projet.

1 BASES DE COMPRÉHENSION

1.1 Mesure de potentiel

- 1.1.1 La mesure de potentiel permet de réaliser une détermination quasi non destructive et à grande surface de l'état de corrosion de l'armature dans des structures en béton armé.
- 1.1.2 Le potentiel électrique d'un acier d'armature en état de corrosion se distingue de celui d'un acier d'armature passif, non corrodé de plusieurs 100 mV. Par cette différence de potentiel, un courant électrique s'établit entre les zones avec différents potentiels (macroélément, voir fig. 1). Ce phénomène est utilisé dans la mesure de potentiel pour faire un diagnostic par rapport à l'état de corrosion de l'armature et pour localiser les foyers de corrosion.
- 1.1.3 Différents effets primaires, secondaires et perturbateurs peuvent influencer le potentiel mesuré. Une identification sur place de ces facteurs d'influence est primordiale.
Des facteurs d'influence primaires et secondaires non identifiés et pas pris en compte peuvent conduire à des interprétations erronées et des facteurs perturbateurs non identifiés à des fausses mesures.
Une liste commentée des facteurs d'influence avec leurs répercussions potentielles est donnée à l'annexe A.
- 1.1.4 Le volume de béton avec son armature relevé avec un point de mesure de potentiel dépend de l'extension du macroélément. Dans le cas d'une armature en état de corrosion dans un béton humide et chargé en chlorures, la largeur de ce volume peut dépasser 50 cm. Dans le cas d'un béton sec, elle peut être inférieure à 20 cm. Ce fait joue un rôle important pour la spécification de la trame de mesure et pour la localisation de l'armature en état de corrosion dans le cas des trames larges.
- 1.1.5 Pour la mesure du potentiel, une électrode de référence est posée sur la surface du béton, et la différence de potentiel par rapport à l'armature connectée est enregistrée au moyen d'un appareil de mesure de potentiel (fig. 1).
Les électrodes de référence et les appareils de mesure requis pour la mesure de potentiel sont décrits à l'annexe B.
- 1.1.6 En général, on investigue avec la mesure de potentiel la première nappe d'armature qui se situe le plus près de la surface de mesure. Souvent (p. ex. lors d'un relevé d'état), les zones particulièrement exposées au risque de corrosion ne sont pas directement accessibles (p. ex. armature arrière des murs de soutènement ou armature supérieure d'un tablier de pont).
Lorsque la mesure de potentiel est utilisée pour investiguer une armature non accessible depuis la face accessible (parement aval, face inférieure), on tiendra compte du fait que la détectabilité d'un foyer de corrosion diminue avec l'épaisseur croissante de l'élément d'ouvrage. Ce phénomène peut être compensé avec une trame de mesure plus serrée.
Outre l'épaisseur de l'élément, ce sont l'humidité du béton et la taille du foyer de corrosion qui jouent un rôle.
Ce type d'application de la mesure de potentiel n'est uniquement indiqué que si l'armature accessible ne corrode pas ou au moins pas aux mêmes endroits que l'armature inaccessible.
Une telle approche de mesure peut avoir du succès si l'élément d'ouvrage n'est pas plus épais qu'env. 0,3 à 0,5 m, si le béton présente une conductivité électrique suffisante et si l'armature accessible ne corrode pas. L'influence des foyers de corrosion adjacents doit être prise en compte.
- 1.1.7 Une électrode référence de type cuivre/sulfate de cuivre (abréviation: CSE) est recommandée pour la mesure de potentiel. Des détails sont donnés à l'annexe B.
L'utilisation d'autres types d'électrode de référence est possible (p. ex. argent/chlorure d'argent)
Les données de mesure doivent toujours être référencées au type d'électrode de référence utilisé.

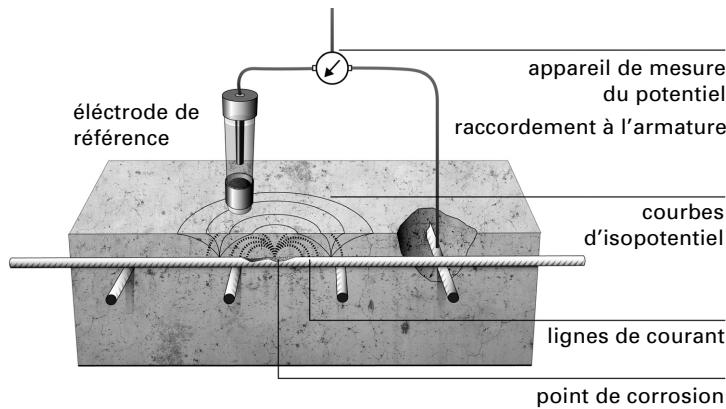


Fig. 1:
Description schématique
du principe de mesure

1.2 Types de mesure de potentiel

1.2.1 La mesure de potentiel ponctuelle est applicable à une large échelle et ne nécessite qu'un faible investissement en matériel de mesure.

En règle générale pour la mesure ponctuelle, une seule électrode de référence est utilisée avec une large trame de mesure par rapport aux dimensions de l'élément d'ouvrage. La trame de mesure doit être adaptée à l'objectif d'investigation ainsi qu'à la géométrie de l'ouvrage. Le cas échéant, elle peut être resserrée localement.

A noter que pour la mesure ponctuelle chaque donnée de mesure compte. Des fausses mesures conduisent vite à des interprétations erronées.

- 1.2.2 Pour la mesure du champ de potentiel, plusieurs électrodes simples ou à roue disposées en parallèle sont utilisées en combinaison avec une trame de mesure serrée. Il est ainsi possible de déterminer la distribution du potentiel sur la surface du béton, c'est-à-dire le champ de potentiel.
- 1.2.3 En pratique, la transition entre la mesure ponctuelle et la mesure du champ de potentiel est continue. Le choix du type de mesure pour un certain objet est à faire au cas par cas.

1.3 Objectifs et application de la mesure de potentiel

- 1.3.1 Les mesures de potentiel peuvent être appliquées p. ex. dans le cadre d'un contrôle général de manière aléatoire et à titre indicatif afin de déterminer l'étendue d'autres mesures et l'utilité d'appliquer d'autres méthodes dans le cadre d'une investigation détaillée.
- 1.3.2 Lors d'une investigation détaillée, la mesure de potentiel est généralement à appliquer après l'inspection visuelle et avant des investigations à caractère destructif.
- 1.3.3 Lors d'une investigation détaillée, les mesures de potentiel sont réalisées sur des grandes surfaces pour obtenir, ensemble avec le relevé visuel, une base fiable pour planter de manière ciblée les points de prélèvement et les points d'ouverture des fenêtres de sondage. A titre d'exemple, les objectifs peuvent être:
- Relevé représentatif de l'état de corrosion de l'armature de tous les éléments structuraux principaux avec leurs différentes expositions
 - Evaluation fiable de l'état de corrosion de l'armature et de la menace de l'intégrité de l'armature dus à la contamination en chlorures et/ou dus à la carbonatation
 - Création d'une base suffisante pour pouvoir planifier des mesures constructives de remise en état
 - Délimitation du besoin de remise en état.
- 1.3.4 Lors de l'exécution des mesures constructives de remise en état, les mesures de potentiel sont utilisées ensemble avec les données relatives au profil de teneur en chlorures et à l'enrobage de l'armature pour déterminer la surface et la profondeur du béton à décapier.

- 1.3.5 Lors du contrôle de qualité et d'efficacité, les mesures de potentiel peuvent être utilisées après l'exécution des travaux pour déterminer si les objectifs du projet de remise en état sont atteints (réduction de l'humidité dans le béton).
- 1.3.6 Lorsqu'on dispose des données relatives à l'humidité du béton et/ou à la résistance électrique du béton ainsi que des résultats de plusieurs mesures de potentiel réalisées à certains intervalles, il est possible d'évaluer le changement de l'étendue des foyers de corrosion et de la vitesse de corrosion.
- 1.3.7 Lors de la surveillance, les mesures de potentiel sont utilisées pour suivre l'efficacité dans le temps des mesures réalisées.

1.4 Limites de la mesure de potentiel

Les points suivants sont à considérer lors de la mesure de potentiel:

- La perte de section d'une barre d'armature ne peut pas être quantifiée (seulement au moyen de sondages).
- La mesure de potentiel ne peut détecter des foyers de corrosion éteints, p. ex. en cas d'un béton temporairement ou durablement asséché.
- La mesure de potentiel ne permet pas d'évaluer directement la vitesse de corrosion.
- Lors de la mesure de potentiel, la température de l'air et du béton doit être supérieure à env. +5 °C. En cas de température inférieure, la réalisation de la mesure de potentiel est plus ardue voire pas du tout possible (voir chiffre A.2.2).
- La mesure de potentiel ne peut pas être réalisée en cas de présence d'un film d'eau stagnant ou d'une couche de glace sur le béton.
- La mesure de potentiel n'est pas applicable en présence d'un revêtement diélectrique intact sur le béton (voir chiffre 3.3.8).
- La mesure de potentiel n'est pas applicable en présence d'une armature dotée d'un revêtement diélectrique intact (maillage électrique des barres insuffisant ou inexistant).

1.5 Terminologie

Anode	L'anode est l'électrode ou la surface d'une électrode dans un électrolyte où se déroule principalement la réaction partielle anodique du processus électrochimique, c'est-à-dire l'oxydation.
Résistance du béton	Résistance électrique du béton
Electrode	Comme électrode est désignée un métal qui se trouve dans un électrolyte (p. ex. anode dans le béton, armature dans le béton ou cuivre dans une solution de sulfate de cuivre dans le cas de l'électrode de référence).
Electrolyte	Un électrolyte est un milieu électriquement conducteur tel que sol, eau ou béton. Le courant électrique a lieu par les ions mobiles contenus dans la phase aqueuse de ce milieu.
Cathode	La cathode est une électrode ou la surface d'une électrode dans un électrolyte où se déroule principalement la réaction partielle cathodique du processus électrochimique, c'est-à-dire la réduction.

Corrosion	<p>La corrosion est la réaction d'un matériau avec son environnement, générant une altération mesurable des propriétés et de la fonction de celui-ci.</p> <p>Pour les matériaux métalliques, cette réaction est dans la plupart des cas de type électrochimique. La réaction se compose d'une réaction partielle anodique (p. ex. $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$) et d'une réaction partielle cathodique (p. ex. $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$).</p>
Foyer de corrosion	<p>On entend par foyers de corrosion les zones d'un élément d'ouvrage où l'armature corrode.</p>
Potentiel de corrosion	<p>Le potentiel de corrosion est le potentiel électrique qu'un métal prend dans un certain environnement. Le potentiel de corrosion est mesuré avec une électrode de référence.</p>
Etat de corrosion	<p>Etat de corrosion signifie l'état des métaux relatif à la corrosion. Dans ce cahier technique, il s'agit de l'état de corrosion de l'armature. On distingue l'armature à l'état passif qui ne corrode pas et l'armature à l'état actif qui corrode.</p>
Type de corrosion	<p>L'armature en état de corrosion se caractérise par le type de corrosion (p. ex. corrosion étendue uniforme, à cuvettes ou par piqûres). L'attaque corrosive peut apparaître unilatéralement ou sur tous les côtés d'une barre d'armature (omnilitéralement).</p>
Macroélément	<p>Un macroélément est un élément galvanique qui apparaît lors d'une corrosion d'un matériau métallique dans un électrolyte. Il est souvent à l'origine d'une corrosion locale.</p> <p>La cause d'un macroélément est la présence de potentiels de corrosion distincts (différents métaux ou différents états d'un métal, différents électrolytes autour d'un métal).</p> <p>Des zones anodiques et cathodiques se forment dans un macroélément, c'est-à-dire que la réaction de dissolution métallique (réaction partielle anodique) et la réaction associée (réaction partielle cathodique) se déroulent sur des zones de surface physiquement séparées (distance de l'ordre du cm au m).</p>
Electrode de référence	<p>L'électrode de référence est une électrode de mesure servant au relevé du potentiel d'une autre électrode qui se situe dans un électrolyte. Seules des électrodes qui sont le moins polarisables possible et qui ont un potentiel connu et constant par rapport à l'électrode standard à hydrogène peuvent être utilisées en tant qu'électrodes de référence. Les potentiels d'une série d'électrodes de référence habituelles par rapport à l'électrode standard à hydrogène sont:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Electrode standard à hydrogène: 0 mV_{SHE} – Electrode à cuivre / sulfate de cuivre: +320 mV_{CSE} – Electrode à argent / chlorure d'argent: +200 mV_{SSE}

2 EXIGENCES AUX SPÉCIALISTES IMPLIQUÉS

- 2.1.1 Dès le constat du besoin d'une mesure de potentiel jusqu'à la finalisation du rapport de mesure et l'intégration des résultats de la mesure de potentiel dans un concept d'intervention, il y a de nombreux spécialistes qui sont impliqués et auxquels différentes exigences incombent.
- 2.1.2 *Entité adjudicatrice (maître d'ouvrage, auteur du projet):* L'entité adjudicatrice doit disposer des connaissances fondamentales des possibilités et de la réalisation des mesures de potentiel. Lorsque ces compétences font défaut, il convient de demander conseil à un spécialiste compétent.
- 2.1.3 *Spécialiste en mesure de potentiel:* La conception, la préparation, l'exécution, l'évaluation et l'interprétation de la mesure de potentiel requièrent, outre des compétences approfondies et de l'expérience en matière de technique de mesure, de l'appareillage ainsi que de la technologie des matériaux, également des compétences en matière d'ingénierie en structures.
Pour cette raison, les mesures de potentiel ne doivent qu'être réalisées sous la direction et la responsabilité d'un «spécialiste en mesure de potentiel».
- 2.1.4 On entend par «spécialiste en mesure de potentiel» pour des ouvrages en béton armé une personne qui a été certifiée pour cette activité par un organisme de certification pour personnes indépendant. Cet organisme peut accepter d'autres preuves comme équivalentes.
- 2.1.5 Le spécialiste en mesure de potentiel qui réalise l'interprétation définitive des mesures de potentiel (en prenant en compte les résultats des sondages et, le cas échéant, les autres essais) doit également réaliser les mesures sur place ou au moins les surveiller temporairement. Il est responsable du rapport.
- 2.1.6 *Essais en laboratoire:* Les échantillons de matériau sont à identifier de manière convenable et bien lisible. Le mandat de laboratoire correspondant doit être formulé clairement et sans ambiguïté.
Seuls des laboratoires accrédités peuvent être mandatés pour les essais.
Les essais en laboratoire sont à réaliser selon les normes en vigueur.
- 2.1.7 *Aides auxiliaires:* Le prélèvement des carottes et d'autres échantillons de béton ainsi que l'ouverture et la fermeture des fenêtres de sondage par des aides auxiliaires doivent avoir lieu sous la direction et la surveillance du spécialiste en mesure de potentiel, de l'ingénieur projeteur ou de la direction des travaux. Le cas échéant, cela vaut également pour d'autres activités qui ont été sous-traitées (p. ex. nacelle, camion passerelle, entreprise de construction).
- 2.1.8 *Concept d'intervention / projet d'intervention:* L'intégration des résultats des mesures de potentiel dans un concept d'intervention ou projet d'intervention est normalement prise en charge par l'auteur du projet (ingénieur en structures). En plus d'une large expérience en matière de conception et de réalisation de l'intervention de remise en état, celui-ci doit également disposer des connaissances fondamentales en technologie des matériaux et en mesure de potentiel.
- 2.1.9 *Réalisation de l'intervention de remise en état:* se référer au chiff. 2.1.8.

3 CONCEPTION, PRÉPARATION ET EXÉCUTION DE LA MESURE DE POTENTIEL

3.1 Généralités

- 3.1.1 La mesure de potentiel doit être conçue, préparée et réalisée soigneusement. Les responsabilités pour les différents travaux (mesure de potentiel, investigations complémentaires, prélèvements d'échantillons, travaux annexes, etc.) sont à clarifier et à définir suffisamment tôt. L'annexe E contient des indications par rapport à la répartition des responsabilités et par rapport à la mise en soumission.
- 3.1.2 Les mesures de potentiel et d'éventuelles investigations complémentaires sont à documenter de manière à ce qu'elles soient compréhensibles et qu'elles puissent être répétées ou complétées à un moment ultérieur.
- 3.1.3 L'équipement nécessaire pour réaliser une mesure de potentiel est répertorié à l'annexe B.

3.2 Conception et préparation

- 3.2.1 La trame de mesure est à adapter à l'objectif de la mesure de potentiel ainsi qu'à la dimension et la géométrie de l'élément d'ouvrage à investiguer.
- 3.2.2 Lors d'un contrôle général, la trame de mesure est à choisir de façon à ce que l'état de corrosion de l'élément d'ouvrage à investiguer puisse être relevé de manière représentative.
- 3.2.3 En cas d'une exposition clairement dépendante de l'orientation, la trame de mesure est à resserrer (p. ex. 0,25 m) dans la direction du gradient supposé de contamination en chlorures (p. ex. en sens vertical pour des piliers ou des parois amont de galeries exposés aux éclaboussures de chlorures).
- 3.2.4 Lorsque la mesure de potentiel est utilisée pour la localisation précise des zones à remettre en état (p. ex. sur un tablier de pont dans le cadre des mesures constructives), les éléments d'ouvrage à contrôler doivent être mesurés à surface intégrale et avec une trame de mesure serrée (typiquement 0,25 m × 0,25 m).
- 3.2.5 La conception et la préparation de la mesure de potentiel comprend les tâches suivantes:
- Prendre connaissance des plans et des rapports de relevé d'état antécédents.
 - Déterminer les objectifs, l'étendue et le moment de la mesure de potentiel et des investigations complémentaires ainsi que les détails de la procédure (p. ex. déroulement temporel, étapes, surfaces d'essai). La trame de mesure adaptée à l'objectif et à l'élément d'ouvrage est à spécifier. Les conditions météorologiques sont à prendre en compte et des dates alternatives sont à prévoir.
 - Assurer l'accessibilité de l'ouvrage (portes, passages, clés, gestion du trafic). Organiser les équipements auxiliaires nécessaires (lumière, nacelle, camion passerelle, échafaudage) et clarifier la responsabilité pour leur mise à disposition.
 - Se renseigner par rapport à l'état de surface du béton (rugueux, lisse, revêtu, brut). En cas d'un revêtement, des essais préliminaires peuvent être indiqués. Se renseigner si un revêtement peut être ôté ponctuellement ou par bandes si nécessaire.
 - Se renseigner si des influences perturbatrices sont à anticiper (annexe A). Le cas échéant, identifier le type d'influence perturbatrice et prévoir des contre-mesures et des essais préliminaires.
 - Certains travaux sur le chantier (tels que hydrodémolition, sablage, soudage ou fort trafic de chantier) peuvent gêner et retarder les mesures ou même les rendre impossibles.
 - Se renseigner par rapport à la sécurité des personnes et des choses lors de l'exécution des investigations (p. ex. écart nécessaire par rapport aux lignes à haute tension lors des interventions avec un camion passerelle). Préparer les mesures d'accompagnement éventuellement nécessaires (p. ex. mesure de la vitesse du vent pour des travaux avec un ascenseur de façade ou avec un camion passerelle). Se référer aux exigences de la SUVA, des CFF ou d'autres instances).

- Si les investigations risquent de provoquer une gêne du trafic ou d'une autre forme d'utilisation, il faut anticiper les mesures nécessaires (information aux utilisateurs, signalisation, fermeture, déviation) suffisamment tôt avec les instances responsables (p. ex. concierge, propriétaire, exploitant). Les exigences en matière de sécurité de la police et de la SUVA sont également à respecter.
- Les positions des sondages et des prélèvements par carottage sont à définir en accord avec la DT ou le mandant. Pour des ouvrages avec des exigences élevées par rapport à l'aspect (p. ex. ouvrages importants en béton apparent, monuments), il est nécessaire d'obtenir l'accord du propriétaire et/ou de l'exploitant, et éventuellement du service de la protection du patrimoine bâti. L'exploitant doit être préalablement informé des éventuelles nuisances sonores (carottage et piquage sur des immeubles d'habitation).

3.3 Travaux préparatoires avant la mesure

- 3.3.1 La trame de mesure est à tracer avec une craie grasse ou une craie au gypse. Des sprays de couleur sont à utiliser avec parcimonie. Pour des ouvrages avec des exigences élevées par rapport à l'aspect (p. ex. ouvrages importants en béton apparent, monuments), le type de marquage est à convenir préalablement avec le propriétaire et/ou l'exploitant.
- 3.3.2 La position et le nombre de points de raccordement à l'armature est à spécifier. L'armature est dégagée par piquage ou est percée. Deux raccordements par élément monolithique sont à créer (avec au moins un à l'armature). D'autres possibilités de raccordement sont p. ex.:
 - Joints de chaussée sur des ponts, à condition qu'ils soient soudés à l'armature.
 - Equipements de mise à terre le cas échéant
 - Poutres métalliques sur des structures mixtes.
- 3.3.3 La longueur du câble entre le point de raccordement à l'armature et l'appareil de mesure ne devrait pas dépasser 250 m. En cas de présence d'un effet perturbateur par des courants alternatifs induits, il convient d'utiliser des câbles les plus courts possible.
- 3.3.4 Le bon maillage électrique de l'armature doit être vérifié avant la mesure de potentiel:
 - Mesurer la résistance électrique entre les différents points de raccordement à l'armature
 - Mesurer la tension continue entre les points de raccordement
 - Mesurer le courant continu entre les points de raccordement.
Le raccordement à l'armature est en ordre lorsque, après déduction des résistances des câbles, la résistance entre les différents points de raccordement à l'armature est $< 1 \Omega$, la tension continue est $\leq 1 \text{ mV}$ et le courant continu est $\leq 0,1 \text{ mA}$.
- 3.3.5 L'écart de potentiel à un point de mesure donné en utilisant différents points de raccordement à l'armature ne devrait pas excéder 10 mV. Les résultats des mesures de contrôle sont à protocoler.
- 3.3.6 Avant chaque mesure la résistance du circuit de mesure complet avec l'électrode de référence posée sur le béton est à déterminer pour contrôler les câbles, les raccordements à l'armature et l'électrode de référence. La résistance doit être inférieure à $10 \text{ k}\Omega$.
- 3.3.7 L'éponge ou le feutre à la pointe de l'électrode de référence qui a été mouillé avec de l'eau du réseau donne généralement un contact suffisamment bon avec le béton. Afin de pouvoir réaliser les mesures de manière rationnelle, il est nécessaire que les valeurs de potentiel se stabilisent rapidement. Dans le cas contraire, un mouillage préalable de la surface du béton est requis (décision à prendre par le spécialiste en mesure de potentiel).
- 3.3.8 En présence de revêtements sur le béton, des mesures comparatives avant et après ponçage permettent de déterminer leur influence. Pour des revêtements perméables, un arrosage répété avec de l'eau permet souvent d'améliorer considérablement la conductivité et rend ainsi possible les mesures de potentiel. Un léger offset des potentiels dus aux revêtements est normalement acceptable.
- 3.3.9 Les résultats des mesures de contrôle et des essais préliminaires sont à protocoler. On peut commencer avec les mesures à proprement parler seulement lorsque les mesures de contrôle donnent une issue positive.

3.4 Réalisation de la mesure de potentiel

- 3.4.1 Il faut attendre avec le relevé et l'enregistrement d'une donnée de mesure, jusqu'à ce que le potentiel se soit stabilisé. Les fluctuations doivent pas dépasser 10 mV.
- 3.4.2 Lors d'une mesure avec un contact permanent entre l'électrode de référence et le béton, telles que les mesures avec un système d'électrode à roue, le délai d'attente est inférieur comparé aux mesures avec une électrode à contact non permanent (mesure ponctuelle).
- 3.4.3 La pression d'application des électrodes de référence sur la surface du béton devrait être la plus régulière possible. Cela est particulièrement important pour des mesures avec des systèmes à multi-électrodes sur des surfaces bombées, inégales ou rugueuses ainsi que sur des surfaces verticales ou au plafond.
- 3.4.4 La plausibilité des potentiels relevés est à contrôler continuellement.
- 3.4.5 D'éventuels dégâts et singularités de surface sont à protocoler en même temps que les valeurs de potentiel et à consigner dans le rapport.

3.5 Investigations complémentaires destinées à l'interprétation de la mesure de potentiel

- 3.5.1 Pour l'évaluation et l'interprétation de la mesure de potentiel il est généralement nécessaire de prélever et d'analyser des échantillons de béton (p. ex. pour la teneur en chlorures) et de réaliser des sondages (voir chiff. 3.6). Les points de prélèvement et de sondage sont à définir sur la base des résultats de la mesure de potentiel.
- 3.5.2 Le nombre et la répartition des points de détermination de la teneur en chlorures et de la profondeur de carbonatation sont à choisir de façon à ce qu'ils soient représentatifs pour l'élément d'ouvrage et à ce qu'ils permettent d'établir une corrélation entre le potentiel et la teneur en chlorures au niveau de l'armature, respectivement l'état de carbonatation du béton.
- 3.5.3 Les échantillons de béton peuvent être des éclats de béton, des carottes ou de la farine de forage (exigences par rapport au prélèvement d'échantillons voir SN EN 14 629). Les carottes ont l'avantage de permettre à tout moment de compléter les paliers de profondeur analysés par des paliers supplémentaires. Elles permettent aussi d'identifier la présence éventuelle de couches ou d'interfaces dans le béton.
- 3.5.4 L'interprétation des résultats de la mesure de potentiel nécessite de connaître l'enrobage de l'armature. Les mesures d'enrobage peuvent être réalisées au moyen de méthodes non destructives sous forme de mesures individuelles, lignes de mesure ou champs de mesure et complémentairement dans les sondages.
- 3.5.5 L'évaluation et l'établissement du rapport des investigations complémentaires sont à adapter aux exigences formulées.

3.6 Sondages

- 3.6.1 On entend par sondages des zones à dimensions réduites d'environ 0,20 m × 0,20 m jusqu'à environ 1,0 m × 1,0 m, dans lesquelles l'armature est dégagée de manière ciblée pour déterminer l'état, le type et le degré de corrosion ainsi que l'enrobage effectif.
- 3.6.2 Les sondages et les prélèvements d'échantillons de béton constituent une intervention destructive et potentiellement dérangeante pour l'aspect de l'ouvrage. Pour cette raison, ils doivent être planifiés et préparés soigneusement et seulement être exécutés si ils sont vraiment nécessaires. Ils sont à combiner dans la mesure du possible avec d'autres investigations moins destructives.

- 3.6.3 Les sondages sont à réaliser uniquement dans les zones où le champ de potentiel est homogène et où il présente clairement un minimum ou un maximum; des zones avec un fort gradient de potentiel sont à éviter. Il est utile de prélever des échantillons de béton dans des sondages pour déterminer la teneur en chlorures, la profondeur de carbonatation et/ou la qualité du béton.
- 3.6.4 L'annexe C donne des indications comment réaliser des ouvertures de sondage et comment les documenter.
- 3.6.5 Le nombre, la position et les dimensions des sondages et des prélèvements d'échantillons dépendent principalement des facteurs suivants:
- du type et des dimensions de l'ouvrage ou de l'élément d'ouvrage
 - des objectifs d'investigation
 - de la trame de mesure utilisée. Les dimensions des sondages devraient au moins être égales aux dimensions d'une maille de trame
 - du genre de cause de la corrosion
 - des résultats de la mesure de potentiel et des constats visuels
 - des résultats des investigations complémentaires (surtout mesures d'enrobage de l'armature)
 - de l'expérience de l'entreprise de construction et de l'ingénieur.
- 3.6.6 Le degré de corrosion de l'armature est à déterminer selon l'annexe D.

4 ÉVALUATION ET INTERPRÉTATION

4.1 Généralités

- 4.1.1 Les valeurs de potentiel peuvent être présentées sous forme de tableaux, de graphiques ou sur des plans, toujours en faisant attention à employer le signe correct et à indiquer le type d'électrode de référence utilisé. Des dérogations par rapport à cette règle sont à indiquer clairement.
- 4.1.2 Les résultats de la mesure de potentiel sont à présenter de manière à ce qu'ils puissent être compris rapidement par un tiers (maître d'ouvrage, ingénieur).
- 4.1.3 Le type de représentation dépend du nombre de données de mesure. L'utilisation de cartes de potentiel et d'une évaluation statistique ne fait que du sens à partir d'environ 50 à 100 données.

4.2 Représentation

- 4.2.1 L'élément d'ouvrage est à représenter (schématiquement) sous forme d'un tableau dans lequel les données de mesure sont insérées. Les zones avec certaines valeurs de potentiel peuvent être marquées avec des couleurs ou des niveaux de gris. La trame de mesure utilisée doit être identifiable.
- 4.2.2 En règle générale, un incrément de couleur correspondant à 20 à 50 mV est à utiliser pour la carte colorée des potentiels. L'échelle de couleur est à garder homogène au sein d'un ouvrage ou d'un élément d'ouvrage.
- 4.2.3 La représentation des valeurs de potentiel sous forme de courbes d'isopotentiel n'est indiquée qu'en cas d'exception et requiert un soin particulier.

4.3 Analyse statistique

- 4.3.1 L'analyse statistique des données de potentiel ainsi que la représentation correspondante servent à identifier les niveaux de seuil de potentiel pour la délimitation des zones avec une armature en état de corrosion active, respectivement en état passif.
Dans la représentation statistique les données de mesure d'un élément d'ouvrage sont considérées comme une seule population statistique. La référence positionnelle des valeurs individuelles est alors perdue.
Il est avantageux que les données de mesure qui sont analysées et représentées statistiquement (distribution des fréquences ou des fréquences cumulées) soient issues d'une trame de mesure régulière.
- 4.3.2 Pour déterminer la distribution des fréquences, les données de mesure sont réparties dans des classes (intervalles de potentiel), comptées et leur fréquence tracée en fonction du potentiel (fig. 2).
L'intervalle de classe ne doit pas dépasser 10 mV.
- 4.3.3 Une distribution des fréquences cumulées peut être obtenue en traçant la somme cumulée des nombres de valeurs de potentiel en fonction du potentiel.
En règle générale, la distribution des fréquences cumulées est dressée dans un diagramme de probabilité normale (fig. 3). Une distribution gaussienne correspond dans ce diagramme à une droite. Plusieurs droites correspondent à différentes distributions, représentant p. ex. l'armature qui corrode et l'armature en état passif.
Plus une droite est raide, plus la distribution du potentiel est étroite.

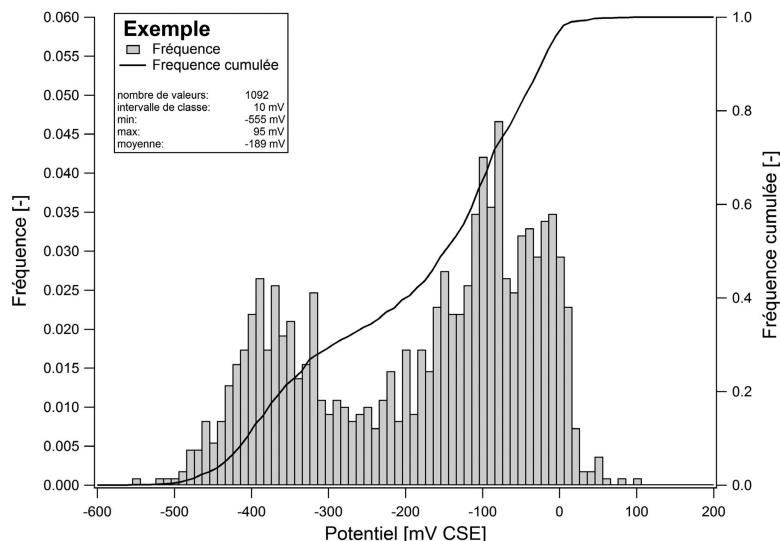


Fig. 2:
Distribution des fréquences
des valeurs de potentiel
(exemple)

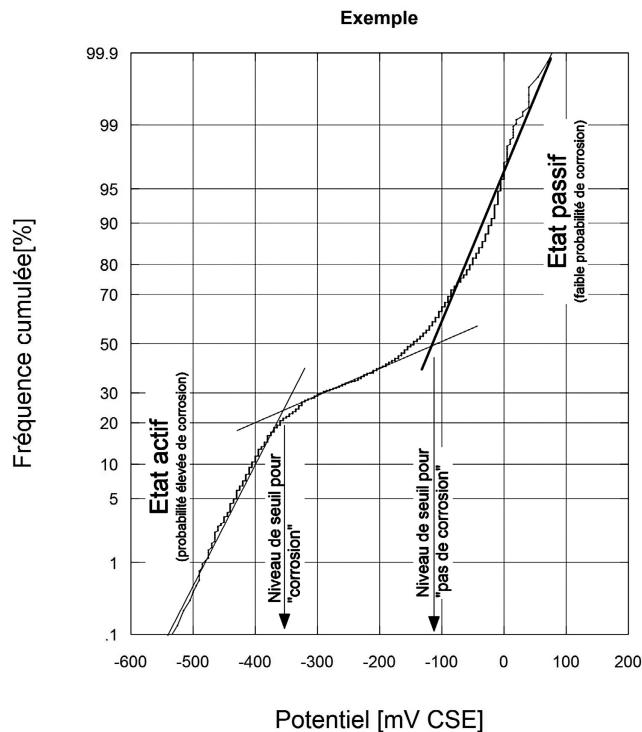


Fig. 3:
Distribution des fréquences
cumulées des valeurs de
potentiel dressée dans
un diagramme de proba-
bilité normale (exemple)

- 4.3.4 En cas de commentaires se rapportant à une surface, tel que le pourcentage de la surface investi-
gée qui présente de la corrosion, la surface par point de mesure doit être considérée en tenant
compte des dimensions de l'élément d'ouvrage et de la trame de mesure.

4.4 Investigations complémentaires

- 4.4.1 Les investigations complémentaires servent ensemble avec la mesure de potentiel à identifier les causes et le degré de la corrosion de l'armature.
- 4.4.2 Les résultats de toutes les investigations complémentaires sont à récapituler de façon claire et à documenter suffisamment.

4.4.3 La position des points de prélèvement (p. ex. prélèvement de carottes ou de farine de forage), la position et les dimensions des ouvertures de sondage ainsi que la position des autres investigations réalisées doivent être implantées précisément dans les représentations graphiques des résultats de la mesure de potentiel. Cela vaut tout particulièrement pour des ouvertures de sondage (voir chiff. 3.6 et annexe C).

4.5 Interprétation

4.5.1 Le but de l'interprétation de la mesure de potentiel est de déterminer les niveaux de seuil de potentiel pour «corrosion» (état de corrosion actif, probabilité élevée de corrosion) et «pas de corrosion» (état passif, faible probabilité de corrosion).

Les niveaux de seuil de potentiel et les résultats des investigations complémentaires permettent ensuite de déterminer la position et l'étendue des zones avec corrosion (probabilité élevée de corrosion) et le cas échéant l'ampleur et la profondeur de décapage du béton.

4.5.2 Les niveaux de seuil de potentiel sont déterminés à l'aide de tangentes tracées dans la distribution des fréquences cumulées sur le diagramme de probabilité normale (fig. 3). De cette manière, il est possible de relever au niveau des potentiels supérieurs (valeurs peu négatives voire légèrement positives) la distribution de potentiel de l'armature en état passif (faible probabilité de corrosion) et au niveau des potentiels inférieurs (valeurs davantage négatives) la distribution de potentiel de l'armature en état de corrosion (probabilité élevée de corrosion). Entre les deux se trouve la plage transitoire.

4.5.3 Les paramètres suivants sont à prendre en compte lors de l'interprétation de la mesure de potentiel:

- Grandeur d'influence en matière de chimie de corrosion, tels que le niveau de potentiel général, la distribution et le gradient du potentiel, la taille des foyers de corrosion ou l'étendue des macroéléments (influences primaires, annexe A.1)
- Des facteurs en relation avec l'ouvrage, tels que type, construction et lieu de l'ouvrage, fissures (aquifères ou sèches), joints (aquifères ou secs), qualité et humidité du béton, teneur en chlorures, état de carbonatation, anciens points de reprofilage (influences secondaires, annexe A.2)
- Des éléments d'ouvrage galvanisés, des pièces d'acier à l'air libre (influences secondaires, annexe A.3).

Des paramètres importants (zones humides, fissures majeures, etc.) peuvent être reportés dans la carte de potentiel pour faciliter l'interprétation.

4.5.4 Les niveaux de seuil de potentiel déterminés sont à comparer avec les autres informations, tels que les constats visuels les particularités (éclatements, taches de rouille, colorations, fissures aquifères ou sèches, armature apparente), et les résultats des investigations complémentaires selon chiff. 4.4.

Les relations entre potentiel et les paramètres suivants sont à analyser, à présenter et à évaluer:

- Etat de l'armature dans les sondages (face avant et si nécessaire arrière)
- Profil de contamination en chlorures et le cas échéant teneur critique en chlorures pour acier d'armature et de précontrainte
- Enrobage de l'armature
- Profondeur de carbonatation
- Humidité et résistance électrique du béton
- Propriétés du béton.

4.6 Evaluation de l'état de corrosion de l'armature et de l'évolution de l'état

4.6.1 L'évaluation et l'interprétation soigneuses des résultats de la mesure de potentiel en combinaison avec les résultats des investigations complémentaires (notamment les sondages) doivent permettre d'évaluer de manière suffisamment précise et fiable l'état de corrosion de l'armature d'un ouvrage.

4.6.2 Un pronostic éventuel de la vitesse de corrosion ou de l'évolution de l'état doit être suffisamment fondé dans le rapport pour qu'il puisse être utilisé pour l'évaluation des mesures d'intervention et/ou l'élaboration d'un concept d'intervention.

4.6.3 Tous les foyers de corrosion ne sont pas pareillement dangereux pour la durabilité et la sécurité structurale d'une structure.

L'évaluation du danger que représentent les foyers de corrosion avec une certaine perte de section pour la durabilité et la sécurité structurale d'un élément d'ouvrage ne fait pas l'objet du rapport de mesure de potentiel.

Si, sur la base des résultats de la mesure de potentiel, des profondeurs d'élimination de béton sont définies, celles-ci doivent être contrôlées et validées par l'ingénieur en structures responsable de la statique de l'ouvrage (cf. aussi norme SIA 269/2, chiff. 7.4.2.5).

5 RAPPORT

5.1 But

Le rapport doit présenter l'objectif ainsi que les données pertinentes de la mesure de potentiel et des éventuelles investigations complémentaires afin que les investigations soient compréhensibles et qu'elles puissent être répétées ou complétées à un moment ultérieur.

Les foyers de corrosion détectés sont à documenter de manière appropriée.

5.2 Contenu (réalisation)

Font partie d'un rapport:

- Plans de l'objet et de situation
- Indication des surfaces mesurées
- Date des investigations
- Données relatives à la mesure de potentiel (type de mesure de potentiel, trame de mesure, type de mouillage, type d'électrode de référence, position des points de raccordement à l'armature, type des appareils de mesures)
- Type des moyens auxiliaires utilisés
- Données par rapport à l'humidité du béton (visuel, qualitatif) et par rapport à la température (soleil/ombre)
- Données par rapport aux conditions météorologiques avant et pendant les investigations
- Données par rapport à la position et au nombre de sondages (y c. protocoles détaillés) et d'échantillons de béton prélevés.

5.3 Contenu (évaluation)

En outre, le rapport doit contenir toutes les données de mesure, les détails de l'évaluation et de l'interprétation ainsi que les conclusions qui peuvent en être déduites. Cela comprend p. ex.:

- Tableaux et diagrammes avec les résultats d'investigation des mesures de potentiel et d'autres mesures le cas échéant
- Données par rapport à la manière dont les résultats de la mesure de potentiel ont été traités et évalués, représentation graphique de la détermination des niveaux de seuil de potentiel.
- Données par rapport à la position et l'étendue des foyers de corrosion
- Données par rapport au risque ou à l'état de corrosion de l'armature située dans les foyers de corrosion, avec légende servant à l'évaluation du degré de corrosion
- Données par rapport aux zones contaminées par les chlorures ou avec un béton carbonaté jusqu'au niveau de l'armature
- Données par rapport à l'enrobage de l'armature
- Données par rapport à d'éventuels facteurs d'influence perturbateurs
- Données par rapport à d'éventuels constats contradictoires ou peu clairs
- Indications relatives à une évolution probable des dégâts
- Indications relatives aux conséquences potentielles en cas de modification d'un paramètre, p. ex. en raison de certaines interventions ou remises en état partielles (surtout lorsque celles-ci sont déjà connues, planifiées ou en cours d'exécution).

5.4 Dossier de l'ouvrage

Les résultats des mesures de potentiel doivent être intégrés et archivés dans le dossier de l'ouvrage.

Annexe A

Facteurs d'influence et sources d'erreur (informative)

A.1 Explications concernant les facteurs d'influence primaires

A.1.1 Etat de corrosion de l'armature

- Le potentiel de l'armature en état passif et sans corrosion dans le béton avec une teneur d'humidité moyenne se situe entre +0,1 et -0,2 V_{CSE}, tandis que le potentiel d'une armature en état de corrosion dans un béton chargé en chlorures atteint jusqu'à -0,6 V_{CSE}, et dans un béton carbonaté jusqu'à 0,3 V_{CSE}.
- Des valeurs plus basses indiquent une probabilité plus élevée de corrosion de l'armature.
- Des points de corrosion inactifs ou seulement temporairement actifs ne peuvent être localisés avec la mesure de potentiel.

A.1.2 Teneur en chlorures augmentée du béton

- Plus la teneur en chlorures au niveau de l'armature est élevée, plus le potentiel de corrosion s'abaisse.
- Une teneur en chlorures plus élevée augmente la conductivité électrique du béton, ce phénomène est encore renforcé dû aux propriétés hygroscopiques des sels de chlorure qui font augmenter l'humidité du béton.

A.1.3 Humidité et résistance du béton

- L'humidité du béton dépend des conditions d'exposition, de la porosité du béton ainsi que des dimensions et de la situation de l'élément d'ouvrage.
- Lorsque des éléments d'ouvrage sont humides en permanence ou lorsqu'ils se trouvent dans l'eau, les potentiels peuvent atteindre des valeurs très négatives même sans corrosion à cause du manque d'oxygène dans le béton.
- Des éléments d'ouvrage avec une humidité du béton très inhomogène présentent des potentiels de corrosion très variables même sans corrosion. Des changements d'humidité en cours de mesure provoquent des décalages de potentiel.
- Sur des pieds de mur ou de pilier ainsi que sur des éléments en béton armé en contact avec le sol, il faut systématiquement s'attendre à observer un gradient d'humidité du béton selon la hauteur qui ne peut pas être éliminé par un mouillage temporaire de la surface. Des variations de potentiel selon la hauteur sont à évaluer en prenant en compte les différences d'humidité constatées.
- Un béton chargé en chlorures est généralement plus humide qu'un béton sans chlorures et à exposition identique.
- La résistance du béton est inversement proportionnelle à l'humidité et à la teneur en chlorures du béton.
- Des couches de surfaces sèches ou carbonatées tout comme des couches de mortier très denses et des crépis peuvent exhiber une très haute résistance électrique et ainsi décaler le potentiel mesuré à la surface vers des valeurs plus élevées (moins négatives).
- Si le béton est sec, c'est-à-dire s'il ne contient pas d'eau conductible, la mesure de potentiel ne peut pas être exécutée.

A.1.4 Béton carbonaté

- La carbonatation du béton provoque une baisse de la valeur pH de l'eau interstitielle du béton d'initialement $> 12,5$ vers moins de 10. Lorsque le front de carbonatation atteint l'armature (en état passif), le potentiel augmente d'abord légèrement pour ensuite, au moment de l'initiation du processus de corrosion en présence de suffisamment d'humidité et d'oxygène, progressivement redescendre.
- Un béton carbonaté a une résistance électrique plus élevée.

A.1.5 Teneur en oxygène et valeur pH du béton

- La teneur en oxygène du béton au niveau de l'armature augmente de façon proportionnelle à la porosité du béton et inversement proportionnelle à l'humidité du béton et à l'enrobage de l'armature.
- Le potentiel d'équilibre de l'électrode d'oxygène et ainsi le potentiel de l'armature en état passif augmente avec une teneur croissante en oxygène et une valeur pH décroissante.

A.2 Explications concernant les facteurs d'influence secondaires

A.2.1 Enrobage de l'armature

- L'influence de l'enrobage de l'armature est généralement faible par rapport à d'autres facteurs.
- D'éventuels effets d'influence de l'enrobage sur les potentiels mesurés peuvent être identifiés en relevant l'enrobage en parallèle à la mesure de potentiel.

A.2.2 Température

- La température influence la résistance électrolytique du béton et de la disponibilité de l'oxygène. Les variations de température modifient les réactions électrochimiques sur l'armature tout comme le potentiel de l'électrode de référence.
- Des changements de température de moins de 10°C peuvent généralement être négligés. Les différences de température doivent surtout être prises en compte pour des mesures comparatives réalisées pendant une période prolongée. Lorsque les éléments d'ouvrage mesurés présentent des températures significativement différentes, l'évaluation doit en tenir compte.
- La formation d'une couche de glace à la surface compromet la mesure de potentiel en raison des changements de résistance. La formation de glace à la surface du béton peut aussi apparaître lorsque la température de l'air est supérieure à 0°C . Sous ces conditions, il ne faut pas réaliser des mesures de potentiel. On peut admettre une température minimale de l'air et de l'élément d'ouvrage de $+5^{\circ}\text{C}$ pour réaliser de manière fiable la mesure de potentiel.

A.2.3 Composition et âge du béton

- La composition du béton (rapport E/C, type de ciment, additions) influence le potentiel de corrosion. L'influence du rapport E/C est liée à la porosité. Une porosité élevée conduit à des changements d'humidité amplifiés, à une carbonatation accélérée et à une contamination en sels jusqu'à des profondeurs plus importantes (profondeur de pénétration augmentée).
- À état de corrosion comparable, les différences de potentiel entre différentes compositions courantes de béton (ciments selon SN EN 197-1, additions courantes) sont faibles. Néanmoins, un béton avec un ciment de type CEM III présente tendanciellement des potentiels plus bas. Les bétons légers et secs présentent des résistances électriques plus élevées que le béton normal à cause de leur porosité augmentée.
- Des mortiers améliorés en matières plastiques et des mortiers à résine synthétique sont moins alcalins que des mortiers à base de ciment. Ils présentent généralement une plus faible perméabilité à l'eau et à l'oxygène. Les potentiels mesurés peuvent être décalés en sens négatif tout comme en sens positif.
- La surface d'un béton lavé présente une très faible conductivité (manque de peau de ciment). La mesure de potentiel sur un béton lavé nécessite ainsi une attention particulière.

- Des zones remises en état présentent généralement des propriétés de béton divergentes du reste de l'ouvrage. L'interprétation correcte nécessite pour cette raison la connaissance du type et de l'ampleur des interventions de remise en état antérieures.
- Un béton jeune présente dès sa phase de durcissement jusqu'à la passivation complète (3 à 6 mois) des potentiels significativement plus négatifs. Lors des mesures de bétons d'âges différents c'est surtout leur humidité différente qui joue un rôle.

A.2.4 **Fissures et joints, teneur d'humidité augmentée près des fissures**

- Des plans de fissures parallèles à la surface (éclatements, séparations des couches, RAG) peuvent conduire à des potentiels fluctuants. Dans ces cas, le potentiel tend à augmenter (moins négatif).
- Au droit des fissures perpendiculaires à la surface et des joints, le potentiel tend à baisser en raison de l'humidité du béton et par conséquent de la conductivité augmentée. Des fissures et joints aquifères décalent le potentiel vers des valeurs davantage négatives. Elles sont à considérer dans le rapport.

A.2.5 **Nids de gravier, cavités et endroits reprofilés**

- Une armature localement mal enrobée (nids de gravier, cavités → mauvais contact électrolytique) présente le risque que d'éventuels points de corrosion à ces endroits ne soient pas détectés avec la mesure de potentiel. Le potentiel est généralement décalé vers des valeurs moins négatives en cas de mauvais contact électrolytique.
- Des ouvertures de sondage remises en état et des points reprofilés présentent généralement des propriétés de béton divergentes du reste de l'ouvrage. La position des rhabillages visibles est à relever lors de la mesure de potentiel.

A.2.6 **Pièces d'insert métalliques, armature à l'air libre**

- Des pièces en acier ou en acier galvanisé qui ressortent du béton (p. ex. connecteurs, pièces d'attache, puits, joints de chaussée) ainsi que des barres d'armature qui ne sont pas complètement enrobées par du béton décalent le potentiel de corrosion de l'armature adjacente vers des valeurs davantage négatives si le béton est très humide ou mouillé. Si le béton est sec, le potentiel mesuré n'est pas influencé.
- Lorsque la surface du béton est arrosée pour la mesure de potentiel, les effets perturbateurs dus aux pièces métalliques à l'air libre peuvent être réduits en évitant d'arroser ces pièces.

A.2.7 **Revêtements, étanchéités, systèmes de protection de surface**

- Des revêtements d'asphalte, des étanchéités et des revêtements épais peuvent être diélectriques et ainsi rendre une mesure de potentiel impossible. Le cas échéant, ces couches peuvent être percées localement ou la mesure de potentiel peut être réalisée depuis la face arrière ou inférieure de l'élément d'ouvrage (chiff. 1.1.6).
- Des systèmes de protection de surface minces, donc des revêtements pas complètement diélectriques, compliquent la localisation des foyers de corrosion au moyen de la mesure de potentiel et conduisent généralement, avec une résistance d'isolation croissante, à des potentiels plus élevés (moins négatifs). Cela vaut également pour des surfaces avec une imprégnation hydrofuge. En revanche, le potentiel a tendance à s'abaisser en cas de résidus bitumineux sur des tabliers de pont.

A.3 Explications concernant les facteurs d'influence perturbateurs

A.3.1 Circuit électrique de mesure pas fermé

Des erreurs de mesure peuvent avoir plusieurs causes, p. ex.:

- Mauvais contact entre l'électrode de référence et le béton (humidification insuffisante du béton)
- Électrodes de référence non étanches
- Maillage insuffisant de l'armature
- Ignorance des joints de dilatation et de séparation et des bords d'élément (pas d'armature traversante)
- Câbles de mesure endommagés ou mouillés
- Ruptures de câble ou câbles arrachés au niveau du raccordement à l'armature
- Surfaces de béton très crasseuses ou insuffisamment mouillées.

Les effets des défauts techniques sont difficilement estimables et ne peuvent être évités qu'en procédant à des contrôles et étalonnages réguliers. Il est impératif de vérifier continuellement la plausibilité des résultats de mesure.

A.3.2 Courants vagabonds

- Les courants vagabonds dus aux trains alimentés en courant continu (p. ex. tramways) peuvent décaler le potentiel de corrosion autant dans le sens négatif que dans le sens positif. L'effet sur le potentiel de corrosion est analogue à celui des macroéléments avec la différence que le décalage du potentiel peut être considérablement plus important et très fluctuant dans le temps.
- Ce sont surtout les parties en contact avec le sol des ouvrages en béton armé à proximité d'une ligne de train à courant continu ou des installations de protection cathodique appartenant à des tiers qui sont exposées aux courants vagabonds continus.
- Sur des ponts de chemin de fer à courant continu peuvent exister des courants vagabonds entre l'armature du tablier et les rails ou entre le tablier et d'autres éléments d'ouvrage du pont (p. ex. culée, fondation), selon le type de fixation des rails et de l'isolation du bac des rails. Les courants vagabonds qui restent à l'intérieur de l'armature ne changent pas le potentiel de corrosion.
- Sur des éléments d'ouvrage en contact avec le sol et avec l'air, l'influence inductive de l'armature du béton armé par la tension alternative des lignes d'alimentation du chemin de fer ($16\frac{2}{3}$ Hz) ou des lignes à haut tension des centrales d'électricité (50 Hz) peuvent avoir un effet sur les appareils de mesure. Les appareils de mesure modernes sont généralement dotés d'un filtre qui atténue ce genre de perturbation.
- La mesure de potentiel doit être réalisée pendant une interruption de service si la mesure de potentiel est excessivement perturbée par des courants continus ou alternatifs.

Annexe B

Equipement et exigences à l'équipement (normative)

B.1 Equipement

B.1.1 Equipement pour la mesure ponctuelle

La réalisation de la mesure ponctuelle nécessite l'équipement suivant:

- Voltmètre numérique à haute résistance interne (résistance d'entrée: $\geq 10 \text{ M}\Omega$), résolution min. 1 mV, exactitude $\pm 1\%$, plage de mesure min. 1 V
- Electrode de référence
- 1 électrode de référence pour l'étalonnage
- Câbles isolés en cuivre sous forme de câbles simples ou sur rouleaux (diamètre des fils: $\geq 0,75 \text{ mm}$); évt. aussi des câbles blindés
- Pinces ou fiches pour raccorder le câble à l'armature
- Barre télescopique (min. 3 m) ou tuyaux en plastique de longueurs fixes
- Manche pour la barre d'extension pour attacher l'électrode.

B.1.2 Equipement pour la mesure du champ de potentiel

La réalisation de la mesure du champ de potentiel nécessite l'équipement supplémentaire suivant:

- 1 système multi-électrodes (plusieurs électrodes à barre ou à roue en parallèles)
- Enregistreur de données ou ordinateur pour l'acquisition des données y.c. câbles d'interface, software, imprimante (utiliser seulement des appareils robustes).

B.1.3 Accessoires

Outre l'équipement directement nécessaire pour réaliser la mesure de potentiel, les accessoires suivants sont également requis:

- Chevillière, mètre, appareil de mesure des distances
- Moyens de marquage (feutres, craies grasses ou à gypse, cordeau à tracer, spray). Le spray est à utiliser avec parcimonie.
- Récipient d'eau, évt. avec buse d'arrosage
- Appareil de mesure de résistance à tension continue et à tension alternative
- Appareil de mesure de l'enrobage d'armature
- Perceuse, petit outillage (burineuse, pointerolle, papier de verre, lime)
- Evt. génératrice pour l'alimentation en courant et piles de réserve)
- Moyens d'éclairage pour des travaux nocturnes, dans des tunnels ou des caissons de pont
- Dossier de l'ouvrage, bloc-notes et stylos/crayons
- Appareil photo
- Loupe à fissure, fissuromètre
- Matériel d'écriture, évt. dictaphone
- Echelle, pont roulant, nacelle
- Habits de chantier et moyens de signalisation conformes aux exigences en vigueur
- Matériel de réserve et de réparation.

L'équipement nécessaire pour les investigations complémentaires n'est pas mentionné ici.

B.2 Exigences à l'équipement

B.2.1 Exigences à l'électrode de référence

- L'électrode de référence la plus couramment utilisée est l'électrode de cuivre/sulfate de cuivre (abréviation: CSE). Le coefficient de température de cette électrode est relativement petit (env. 1 mV/K entre 0 et 50 °C).
- La conception d'une électrode de cuivre/sulfate de cuivre est illustrée schématiquement dans la fig. B.1.
- L'électrode de référence doit être durable et avoir fait ses preuves pour l'utilisation prévue. Pour des mesures au-dessus de la tête, il faut assurer que la solution touche toujours le fil métallique et le diaphragme.

- La solution de sulfate de cuivre doit toujours être saturée. Ceci est le cas lorsque des cristaux de sulfate de cuivre sont visibles dans la solution.
- Les électrodes de référence doivent être calibrées avant chaque utilisation (p. ex. en mesurant la différence de potentiel par rapport à une électrode étalon dans de l'eau). L'écart de potentiel des électrodes de référence par rapport à la valeur de consigne ne doit pas dépasser ± 5 mV. Sinon il faut renouveler la solution et nettoyer le fil de cuivre.

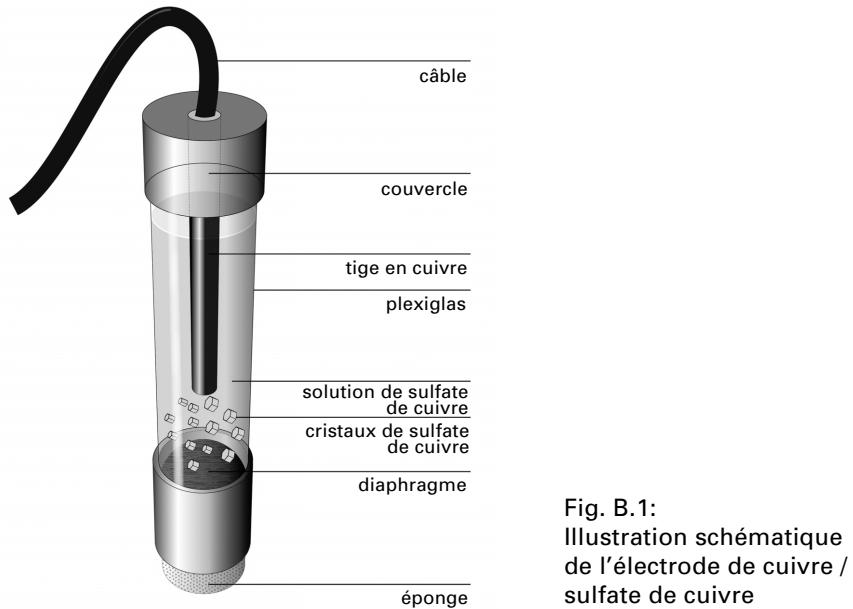


Fig. B.1:
Illustration schématique
de l'électrode de cuivre /
sulfate de cuivre

B.2.2 Exigences aux appareils et câbles de mesure

- Il faut utiliser des appareils si possible électriquement autonomes (batteries) et qui sont adaptés à l'utilisation prévue, calibrés et qui ont fait leurs preuves.
- En règle générale, on utilisera des câbles de mesure très flexibles, isolés avec du PE et comportant au moins 7 fils conducteurs avec une section $\geq 0,75$ mm². Des conducteurs avec isolation en ETFE sont préférables en cas de contact prolongé des câbles avec de l'huile et/ou en cas de températures élevées ainsi que pour des mesures sous l'eau ou par météo très humide.
- Les câbles utilisés doivent être contrôlés visuellement et en mesurant la résistance d'isolation avant chaque intervention. L'isolation des câbles ne doit pas montrer des blessures, sinon elle doit être réparée soigneusement ou le câble concerné doit être remplacé.

B.2.3 Eau pour mouiller la surface du béton

- Pour améliorer le contact entre l'électrode de référence et le béton on peut utiliser l'eau du réseau. L'eau désionisée ne convient pas puisqu'elle n'est pas assez conductible.

Annexe C

Procédure pour les sondages (normative)

C.1 Généralités

Les aspects généraux concernant les sondages sont traités au chiff. 3.6. Les sondages sont à planifier, à préparer, à exécuter et à documenter soigneusement.

C.2 Réalisation des sondages

C.2.1 Marquage des points de sondage

La position doit être relevée par rapport à un système de coordonnées fixe ou par rapport à un élément d'ouvrage indiqué dans les plans à disposition (p. ex. goujons de référence pour le relevé géométrique, poteaux de balustrade, joints, joints de chaussée). Les sondages sont à numérotter et à transcrire dans les plans (plan des dégâts, cartes de potentiel).

C.2.2 On tiendra compte tout particulièrement des points suivants lors de la réalisation des sondages et des carottages:

- Directives de la part du propriétaire, de l'exploitant ou du service de la protection du patrimoine bâti en cas d'ouvrages avec des exigences élevées en matière d'aspect
- Type et position des unités de précontrainte
- Câbles et lignes électriques dans ou sur l'élément d'ouvrage, tels que câbles d'énergie à haute tension (!!) et à 230 V, câbles de télécommunication
- Altération de l'aspect esthétique
- Trafic et sécurité du trafic
- Emissions, immissions
- Possibilité de remise en état
- Temps, météo.

C.2.3 La surface est préparée en décapant, le cas échéant, les revêtements épais (revêtement de chaussée à base d'un enrobé bitumineux ou de béton, étanchéités) et les revêtements minces.

C.2.4 Localiser et marquer la position des barres d'armature sur la surface du béton.

C.2.5 Documenter photographiquement (avant et après le dégagement de l'armature).

C.2.6 Réaliser éventuellement des mesures de vérification du potentiel de corrosion (à convenir).

C.2.7 Prélever, identifier et emballer les échantillons de béton pour les analyses en laboratoire. Les points de prélèvements peuvent être indiqués précisément si les travaux ont été réalisés selon chiff. C.2.1. Sinon, procéder comme convenu ou sur la base de l'évaluation de la mesure de potentiel précédente.

Dégager délicatement l'armature dans les ouvertures de sondage (en cas de valeurs de potentiel correspondantes ou de signes d'une corrosion à l'arrière des barres d'armature); évt. déterminer en même temps la profondeur de carbonatation.

L'état de corrosion de la face arrière (resp. face inférieure) de l'armature peut être pire que celui de la face avant (resp. face supérieure) et doit pouvoir être évalué.

C.3 Documentation

- C.3.1 Dresser une esquisse à l'échelle (vue en plan, coupe). Les points suivants sont à enregistrer et documenter (norme SIA 269/2, chiff. 5.2.5 et fig. C.1):
- Position et points de référence des sondages
 - Dimensions et identification des sondages
 - Points de prélèvement et identification des échantillons de béton pour l'analyse en laboratoire
 - Le cas échéant, épaisseurs des couches et surcharges
 - Le cas échéant, composition de la construction (épaisseurs et états des couches de revêtement, étanchéité, etc.)
 - Indications par rapport à l'état du béton et de la surface du béton (humide-sec, traces de rouille, éclatements, dégâts dus au gel/dégel, etc.)
 - Position, disposition et enrobage de l'armature passive et des unités de précontrainte (au moyen d'un profomètre ou similaire pour l'armature passive et/ou selon plan pour la précontrainte)
 - Enrobage et diamètre des barres d'armature passive dégagées
 - Configuration des nervures des barres dégagées (photo, esquisse)
 - Degré de corrosion des barres d'armature dégagées (détermination selon annexe D)
 - Eventuellement déterminer la profondeur de carbonatation
 - Indication n° de photo.
- C.3.2 Les éléments précontraints sont à investiguer avec circonspection et par étapes. La documentation doit être réalisée avec la plus grande attention et il convient de recourir à un spécialiste en cas de doute:
- Dégager avec prudence la gaine de précontrainte seulement si l'armature passive située plus à l'extérieur présente un degré de corrosion KG4 avec une forte perte de section
 - Ouvrir les gaines intactes seulement s'il y a un doute par rapport à la qualité de l'injection ou par rapport au degré de remplissage des gaines
 - Lorsque des gaines métalliques seront ouvertes, contrôler et déterminer le degré de corrosion à l'extérieur et à l'intérieur de la gaine selon annexe D
 - Déterminer l'état de l'injection et le degré de remplissage des gaines
 - Le degré de corrosion de l'acier de précontrainte est à déterminer selon l'annexe D.
- C.3.3 Un formulaire type «Protocole de sondage» pour la documentation des sondages est donné au tab. C.1.

C.4 Fermeture des sondages et des points de carottage

- C.4.1 Les sondages et points de carottage sont à remettre en état selon les règles de l'art.
- C.4.2 Pour des unités de précontrainte, on se référera à la recommandation de l'ASEP pour l'ouverture et la remise en état des sondages sur des unités de précontrainte.

fenêtre de sondage fs1

ea = enrobage d'armature
 dc = degré de corrosion
 c = carottes
 fs = fenêtre de sondage

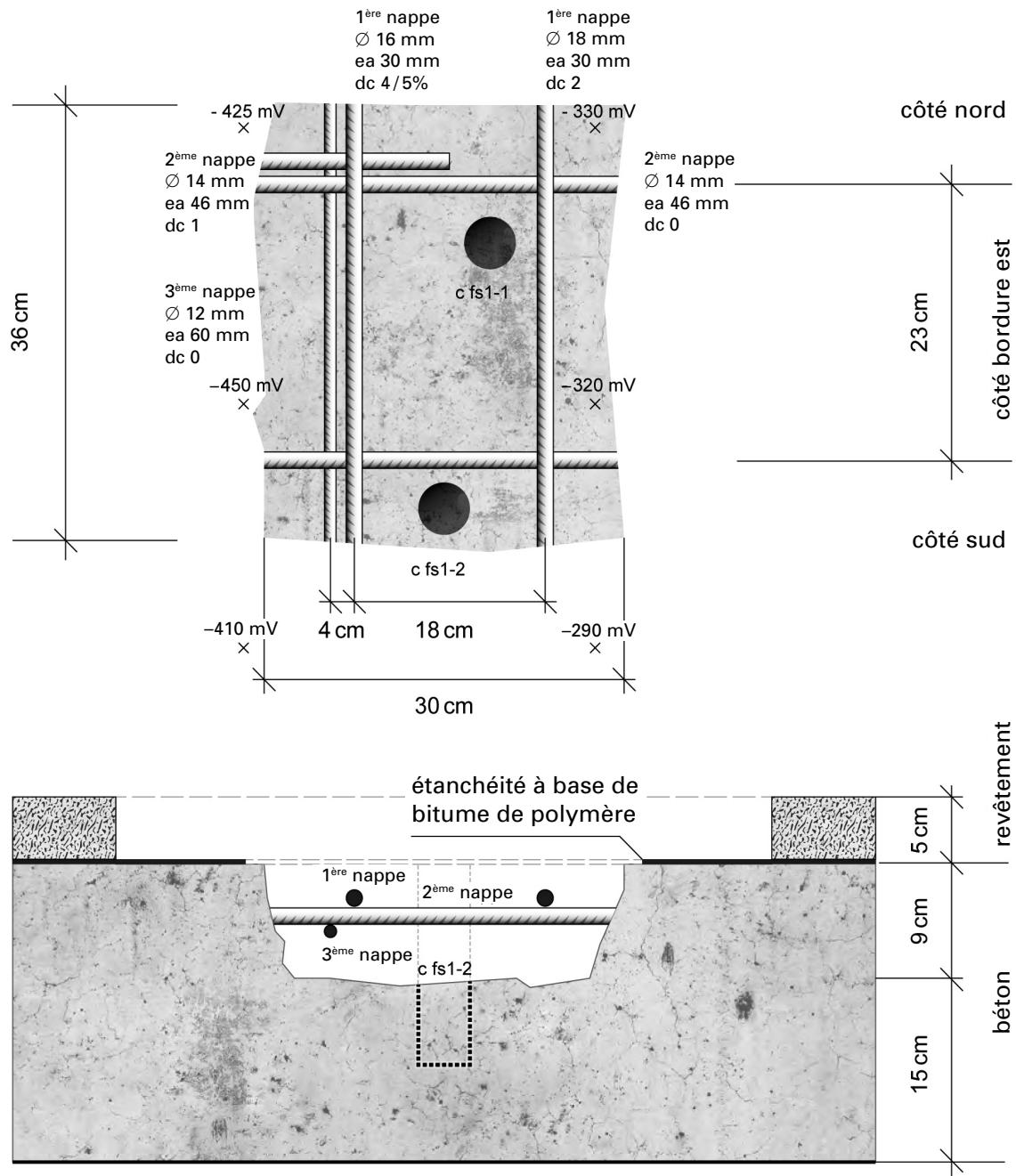


Fig. C.1: Contenu d'une esquisse d'un sondage (exemple)

Tab. C.1: Exemple d'un protocole de sondage

Protocole de sondage

Maitre d'ouvrage:
Objet:
N° d'objet:
Date d'inspection :

Inspection réalisée par:
Météo:

Elément d'ouvrage:	Point d'inspection:	Description						Remarque
		T1 0-10 mm	T2 10-20 mm	T3 20-30 mm	T4 30-40 mm	T5 40-50 mm	T6 50-60 mm	
Situation de départ								
Revêtement								
Étanchéité								
Couche d'égalisation								
Béton								
1 ^{re} nappe d'armature								
2 ^{me} nappe d'armature								
3 ^{me} nappe d'armature								
1 ^{re} câble de précontrainte								
2 ^{me} câble de précontrainte								
Autres								
Degré de corrosion:								
arm. long / transv. / étirer	Fonction / préparation	c [mm]	Nombre [poses]	Diamètre Ø [mm]	Degré de corrosion Kg [-]	Prot. de carbonatation k [mm]	Resistance à la compr.	Situation en chlorures en % de masse / [cm/m]
Depuis la surface depuis le départ	Préparation / étirer	arm. long / transv. / étirer	fonction	Ø [mm]	Kg [-]	Prot. de carbonatation	à la surface po (N/mm ²)	Corrosion en chlorures en % de masse / [cm/m]
Degré de corrosion selon SIA 269/2 « Maintenance des structures porteuses – Structures en béton »:								
Corrosion de l'armature due à la carbonatation du béton	Corrosion de l'armature due à la pénétration des chlorures	KG						
inaltéré	inaltéré	0						
quelques points de rouille superficiels	quelques points et taches de rouille superficiels	1						
taches de rouille, petites érosions locales du matériau	nombreuses taches de rouille, petites érosions locales du matériau	2						
complètement rouillé avec petite érosion du matériau (au maximum, destruction des nerures par la corrosion)	début de corrosion par piqure, diminution de la section ≤ 5%	3						
complètement rouillé avec des cuvettes évidentes, indication de la perte de section en % de la section initiale	corrosion par piqure avec diminution évidente de la section, indiquée en % de la section initiale	4						
Degré de corrosion pour les armatures précontraintes:								
Corrosion de l'armature due à la pénétration des chlorures	Corrosion des gaines métalliques des unités de précontrainte	KG						
inaltéré	inaltéré	0						
quelques points de rouille superficiels	quelques points et taches de rouille superficiels	1						
taches de rouille, petites érosions locales du matériau	nombreuses taches de rouille, perforation locale possible	2						
complètement rouillé avec petite érosion du matériau (au maximum, destruction des nerures par la corrosion)	début de corrosion par piqure, diminution de la section ≤ 5%	3						
complètement rouillé avec des cuvettes évidentes, indication de la perte de section en % de la section initiale	corrosion par piqure avec diminution évidente de la section, indiquée en % de la section initiale	4						
Cl₂ Valeur limite pour initier la corrosion:								
Préconstraining dans gaine	Préconstraining dans gaine	0.YY	Préconstraining dans gaine	Préconstraining dans gaine	0.XX	Préconstraining dans gaine	Préconstraining dans gaine	Préconstraining dans gaine
Issue d'expériences:	Issue d'expériences:	oui / non	Issue d'expériences:	Issue d'expériences:	oui / non	Issue d'expériences:	Issue d'expériences:	Issue d'expériences:
Hypothèse: Dosage en ciment XXX kg/m³								
Indication en pourcentage de masse par rapport au ciment (%m/C)								
gras, si Cl ₂ > valeur limite								
gras et rouge, si Cl ₂ > valeur limite au niveau de l'armature								

Annexe D

Détermination du degré de corrosion (normative)

D.1 Détermination du degré de corrosion et évaluation de l'état de corrosion selon norme SIA 269/2, chiff. 5.2.6

D.1.1 Extrait de SIA 269/2, chiff. 5.2.6:

«La détermination du degré de corrosion sera effectuée selon le tableau 4 (note: le tableau D.1 ci-après est identique au tab. 4 de la norme). La présence de corrosion locale ou sur une zone étendue (cuvettes, corrosion par piqûre) sera consignée. Dans le cas où l'on ouvre la gaine métallique des unités de précontrainte, le degré de corrosion sera également déterminé à l'intérieur de la gaine. Pour l'évaluation du degré de corrosion de l'armature de précontrainte, on convoquera éventuellement un spécialiste.»

- D.1.2 Outre le degré et le type de corrosion, on indiquera également si l'armature est corrodée unilatéralement ou sur toute sa circonférence (omnilatéralement).
- D.1.3 En raison du moindre potentiel d'erreur, il convient de déterminer la réduction du rayon de la barre d'armature due à la corrosion et d'en déduire la perte de section (fig. D.1).

Tableau D.1: Détermination du degré de corrosion KG (tab. identique au tab. 4 de la norme SIA 269/2:2011, chiff. 5.2.6)

Rem.: Les termes «Réduction de section» et «Perte de section» ont la même signification.

Degré de corrosion KG	Corrosion de l'armature due à la carbonatation du béton	Corrosion de l'armature due à la pénétration des chlorures	Corrosion des gaines métalliques des unités de pré-contrainte
0	inaltéré	inaltéré	inaltéré
1	quelques points de rouille superficiels	quelques points et taches de rouille superficiels	quelques points et taches de rouille superficiels
2	taches de rouille, petites érosions locales du matériau	nombreuses taches de rouille, petites érosions locales du matériau	nombreuses taches de rouille, perforation locale possible
3	complètement rouillé avec petite érosion du matériau (au maximum, destruction des nervures par la corrosion)	début de corrosion par piqûre, diminution de la section $\leq 5\%$	perforé
4	complètement rouillé avec des cuvettes évidentes, indication de la perte de section *)	corrosion par piqûre avec diminution évidente de la section *)	complètement corrodé

*) indication de la perte de section en % de la section initiale.

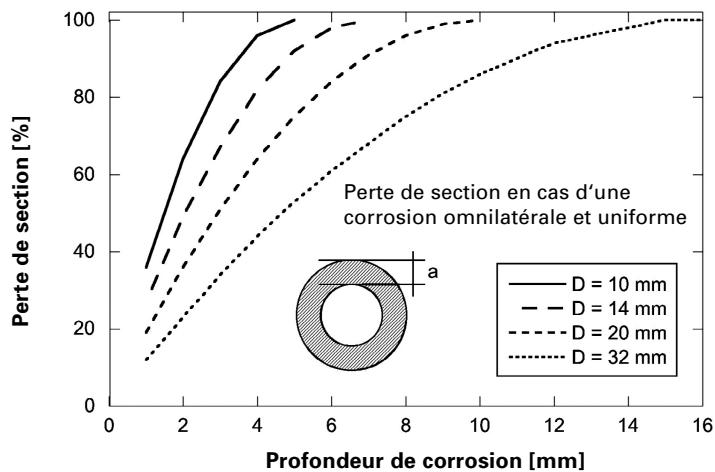


Fig. D.1a:
Perte de section en fonction de la profondeur de corrosion (a) pour différents diamètres de barre et en admettant une corrosion omnidirectionnelle.

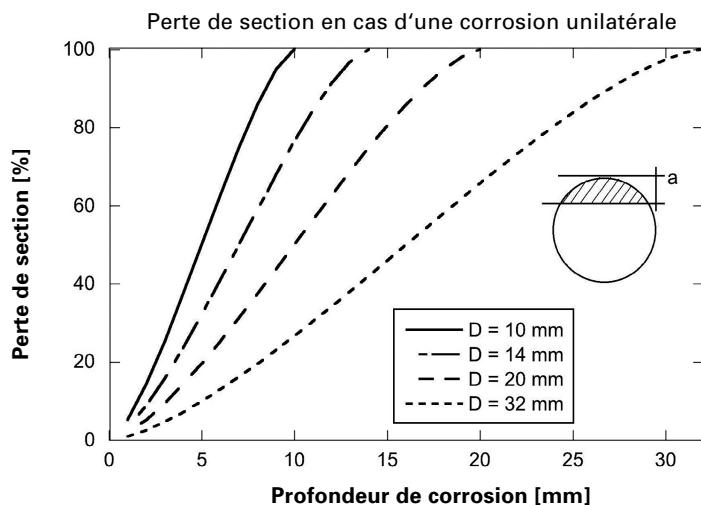


Fig. D.1b:
Perte de section en fonction de la profondeur de corrosion (a) pour différents diamètres de barre et en admettant une corrosion unidirectionnelle.

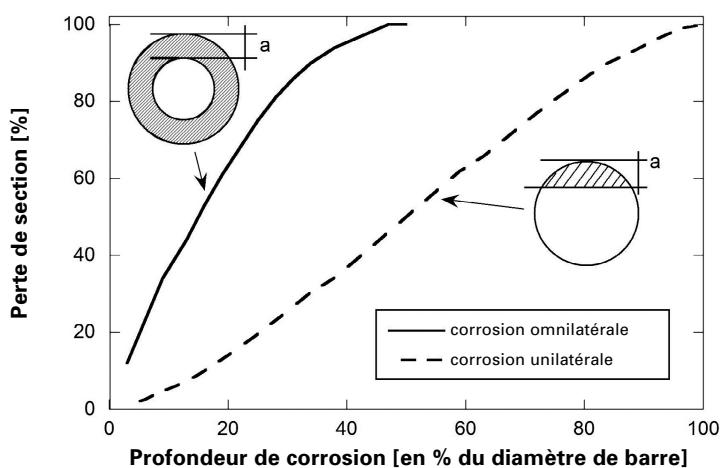


Fig. D.1c:
Perte de section en fonction de la profondeur de corrosion exprimée en % du diamètre de barre pour des corrosions omni- et unidirectionnelles.

Annexe E

Indications par rapport à la soumission (informative)

E.1 Introduction

Ci-après, les différents travaux d'un mandat d'investigation sont structurés selon les étapes de travail. Les mots-clés se réfèrent aux sous-chapitres possibles qui sont à exécuter en fonction du type de mandat. En règle générale, tous les sous-chapitres devraient être utilisés; des sous-chapitres isolés peuvent être omis uniquement en cas exceptionnel.

La page de titre et la mise en page sont à réaliser selon les exigences du maître d'ouvrage.

E.2 Partie administrative

- Indication du maître d'ouvrage
- Indication du propriétaire
- Indication du projeteur / de la direction des travaux
- Indication par rapport au traitement de questions (qui, jusqu'à quand, de quelle façon)
- Indication par rapport à l'offre (jusqu'à quand, sous quelle forme)
- Indication par rapport à la facturation (adresse de facturation, adresse pour contrôle, nombre d'exemplaires, etc.)
- Comment sont traitées d'éventuelles prestations non comprises dans l'offre (en cas d'anticipation ou après coup)
- Comment est traité le renchérissement
- Comment sont traitées des commandes supplémentaires
- Indications des délais (rendu de l'offre, ouverture des offres, adjudication, exécution, rendu du rapport, facturation finale)
- Exigences par rapport au personnel d'inspection (formation, compétences techniques)
- etc.

E.3 Partie organisationnelle et responsabilités

Les responsabilités (tâches et compétences) des spécialistes et entreprises impliqués sont à clarifier et à noter sous forme de matrice avant la mise en soumission. A ce propos le tab. E.1 donne à titre de canevas la structure d'une telle matrice. Elle est à adapter et à compléter en fonction de la question effectivement posée.

E.4 Bases

- Indication des normes / directives
- Indication d'autres documents
- Indication d'intervenants tiers éventuels
- Indications des difficultés
- Indication de travaux se déroulant en parallèle (quoi et par qui)
- Réalisation pendant la journée / la nuit / le week end
- etc.

E.5 Délimitation

- Qu'est-ce qui doit être inclus (en outre le descriptif)?
- Qu'est-ce qui ne doit pas être inclus?
- Quelles prestations sont sous-traitées? Qui est en charge de la commande de ces prestations et comment sont-elles facturées?
- Indication des directives de gestion de trafic / fermetures et de leur gestion
- Gênes par des dépôts de matériel, machines de chantier, etc.
- Ouvertures et fermetures des sondages (qui fait quoi, où et quand? définition des responsabilités)
- Information et recours à des tiers

- Quelles prestations sont mises à disposition par le client et comment sont-elles gérées?
- But des mesures (contrôle, base de projet, assurance qualité, réception des travaux)
- Est-ce que des échantillons de béton sont à prélever et à analyser?
- etc.

E.6 Description de l'ouvrage

- Situation de l'ouvrage
- Description de l'ouvrage
- Plans
- Accès / accessibilité
- Particularités
- Position de la précontrainte et des conduites techniques
- Historique, interventions, inspections
- etc.

E.7 Documents mis à disposition

- Plans
- Rapports
- Documents
- etc.

E.8 Etendue des mesures

- Ce chapitre sert à spécifier les éléments d'ouvrage et leurs surfaces de mesure (à indiquer également sur des plans ou des esquisses). Ces éléments formeront une partie intégrante du rapport.
- Indication de ce qui doit être mesuré et où (élément d'ouvrage, taille des surfaces de mesure, accès, etc.)
- Indication de la trame de mesures
- Indication d'autres essais et mesures à réaliser (in-situ ou en laboratoire)
- Indication de l'état de surface du béton, revêtements, etc.
- etc.

E.9 Rapport

Ici doit être spécifié ce que le mandataire doit fournir sous forme de rapport. La structure / contenu du rapport est à configurer selon le cahier technique SIA 2006:

- Est-ce qu'une information préalable est souhaitée au terme d'une partie des mesures?
- Forme des résultats (numériques, cartes de potentiel, statistiques)
- Procès-verbaux des essais en laboratoire
- Récapitulation des données de mesure
- Evaluations
- Interprétations
- Recommandations
- Modèles à utiliser
- Documentation photographique
- But du rapport:
- Documentation simple des mesures et des essais
- Base pour des ingénieurs projeteurs pour un traitement ultérieur
- Documentation complète et finale à part entière
- Nombre d'exemplaires souhaité (papier, digital)
- etc.

Tab. E.1: Matrice pour définir les responsabilités et compétences des spécialistes impliqués (y c. participation et support)

MO: Maître d'ouvrage
 DT: Direction des travaux
 Sp. pot: Spécialiste mesure de potentiel

AP: Auteur du projet
 ENT: Entreprise de construction
 LAB: Laboratoire d'essai

Pos.	Tâches / compétences	MO/AP	DT	ENT	Sp.pot.	LAB
1.1	Concept d'investigation (étendue des mesures de potentiel, investigations complémentaires, etc.)					
1.2	Documentation des éléments d'ouvrage cachés (précontrainte, conduites techniques, etc.)					
2.1	Coordination avec des travaux se déroulant en parallèle					
2.2	Fermetures, gestion du trafic					
2.3	Organisation nacelles					
2.4	Mise à disposition électricité sur chantier					
2.5	Mise à disposition eau sur chantier					
3.1	Nettoyage des surfaces de mesure					
3.2	Ouverture des points de raccordement à l'armature pour mesure de potentiel					
3.3	Réalisation mesures de potentiel					
4.1	Spécification de la position et du nombre des sondages et prélèvements					
4.2	Marquage des points de sondage et de prélèvement sur l'ouvrage					
4.3	Ouverture et fermeture des sondages					
4.4	Relevé et documentation des sondages					
4.5	Prélèvement des échantillons de béton et fermeture des sondages (carottes, poudre de forage)					
4.6	Essais en laboratoire (analyses de teneur en chlorures, profondeur de carbonatation, porosité caractéristique, microscopie sur lames minces, etc.)					
5.1	Investigations complémentaires in situ (enrobage de l'armature, profondeur de carbonatation, sclérométrie, résistance en traction, etc.)					
5.2	Relevés complémentaires (fissuration, taches d'humidité, nids de gravier, etc.)					
6.1	Représentation des résultats de la mesure de potentiel: Tableaux de données / cartes de potentiels colorés, identifiés sans ambiguïté et de manière compréhensible					
6.2	Inscription de la position détaillée des sondages, des prélèvements et des relevés complémentaires dans les tableaux de données / cartes de potentiel					

Pos.	Tâches / compétences	MO/AP	DT	ENT	Sp.pot.	LAB
6.3	Récapitulation de tous les résultats (essais en laboratoire et investigations complémentaires in situ)					
7.1	Evaluation et interprétation des mesures de potentiel en tenant compte de tous les résultats					
7.2	Interprétation et conclusion finale par rapport à la durabilité et la sécurité structurale de l'élément d'ouvrage					
7.3	Spécification des zones et profondeurs de décapage, en considérant les aspects statique de l'élément d'ouvrage					
7.4	Etablissement rapport, uniquement partie mesure de potentiel					
7.5	Etablissement rapport, investigations complémentaires					
8.1	Contrôles du respect des délais et de la qualité des travaux					
8.2	Contrôle de la qualité technique, plausibilité					

Annexe F

Littérature (informative)

- [1] F. Hunkeler, Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten; Forschungsauftrag AGB 86/90, VSS-Bericht Nr. 510, 1994. Téléchargement (gratuit): <http://www.tfb.ch/de/Publikationen/Publikationsliste.html>
- [2] B. Elsener, C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder and M. Raupach, Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures (RILEM TC 154-EMC), Materials and Structures, Vol. 36, No. 7, 2003, p. 461–471. Téléchargement (payant): <http://www.springerlink.com/content/2950042pj686m665/>.
- [3] M. Büchler und Y. Schiegg, Untersuchungen zur Potenzialmessung an Stahlbetonbauten, Forschungsauftrag AGB 2002/007, VSS-Bericht Nr. 634, 2008. Téléchargement (gratuit): <http://www.mobilityplatform.ch/de/shop/show-item/product/2866/search/634/>.

Groupe du travail Cahier technique SIA 2006

Présidence	Fritz Hunkeler, dr ing. dipl. EPF, Wildegg	Laboratoire des matériaux
Membres	Martin Brem, dr ing. dipl. EPF, Bonstetten Bernhard Elsener, prof. dr ing. dipl. Ing. ETH, Rüschlikon Hans Licht, ing. dipl. TU, Cham Aldo Rancati, ing. dipl. ETS, Jona Manuel Schmid, ing. dipl. EPF, Zurich Yves Schiegg, dr ing. dipl. EPF, Schneisingen Andreas Steiger, ing. dipl. EPF, Lucerne Heidi Ungrecht, dr ing. dipl. EPF, Zurich Urs Vollmer, ing. dipl. ETS, Staufen	Laboratoire des matériaux EPF Zurich Bureau d'études Laboratoire des matériaux Bureau d'études Laboratoire des matériaux Bureau d'études Maîtres d'ouvrage Maîtres d'ouvrage

Commission SIA 262

Président	Hans-Rudolf Ganz, dr ing. dipl. EPF, Zurich	Ingénieur-conseil
Membres	Manuel Alvarez, dr ing. dipl. EPF, Ittigen Daniel Buschor, ing. dipl. EPF, Berthoud Aldo Chitvanni, ing. dipl. EPF, Coire Christoph Czaderski, dr ing. dipl. ETH, Dübendorf Blaise Fleury, ing. dipl. EPF, Eclépens Ernst Honegger, ing. dipl. EPF, Berne Bernard Houriet, dr ing. dipl., Tramelan Fritz Hunkeler, dr ing. dipl. EPF, Möriken Albin Kenel, prof. dr ing. dipl. EPF, Rapperswil Rudolf Lagger, ing. dipl. EPF, Thoune Peter Lunk, dr ing. dipl., Würenlingen Konrad Moser, dr ing. dipl. Ing. EPF, Zurich Aurelio Muttoni, prof. dr ing. dipl. EPF, Lausanne Erdjan Opan, ing. dipl. EPF, Neuchâtel Sylvain Plumey, dr ing. dipl. EPF, Porrentruy Luc Trausch, dr ing. dipl. EPF, Zurich	OFROU Bureau d'études Bureau d'études Empa Industrie Industrie Bureau d'études Laboratoire des matériaux Haute école spécialisée Entreprise Industrie Bureau d'études EPFL Bureau d'études / maître d'œuvre Bureau d'études Bureau d'études
Procès-verbal	Daniel Heinzmann, dr ing. dipl. Ing. ETH, Visperterminen	Haute école spécialisée

Adoption et validité

La Commission centrale des normes de la SIA a adopté le présent cahier technique SIA 2006 le 20 novembre 2012.

Il est valable à partir du 1^{er} janvier 2013. Avec une période de transition d'une année, le chiffre 2.1.4 est valable à partir du 1^{er} janvier 2014.

Il remplace le cahier technique SIA 2006 *Exécution et interprétation de la mesure de potentiel sur des ouvrages en béton armé*, édition 1993.

Copyright © 2013 by SIA Zurich

Tous les droits de reproduction, même partielle, de copie intégrale ou partielle (photocopie, microcopie CD-ROM, etc.) d'enregistrement sur ordinateur et de traduction sont réservés.