

Surveillance des ouvrages d'art

Autor(en): **Andrey, Dominique / Suter, René / Favre, Renaud**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **111 (1985)**

Heft 8

PDF erstellt am: **23.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75621>

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.

Surveillance des ouvrages d'art

par Dominique Andrey, René Suter et Renaud Favre, Lausanne

Les ouvrages d'art représentent des éléments importants d'un réseau de voies de communication. Ils doivent être l'objet d'un contrôle régulier.

La surveillance d'un ouvrage d'art tel qu'un pont doit permettre de se faire à tout moment une idée de son état et de son comportement en service :

- s'ils sont normaux, les opérations d'entretien courant doivent le maintenir dans cet état ;
- s'il sont anormaux ou risquent de le devenir, des mesures doivent être prises pour assurer la sécurité des usagers et des tiers.

L'article présente les principales méthodes d'inspection. Elles sont étudiées au sein de la section « Auscultation des ouvrages d'art » de l'Institut de statique et structures — béton armé et précontraint (IBAP) de l'EPFL, dans le cadre d'un mandat de recherche confié par l'Office fédéral des routes.

1. Introduction

Assurer la sécurité du trafic est certainement le souci primordial de celui qui est responsable de la gestion d'un certain nombre de ponts. Etant presque le seul en possession des renseignements permettant de juger l'état de l'ouvrage, il doit pouvoir fournir aux autorités qui le supervisent l'assurance que le pont peut être laissé ouvert au trafic. Il est cependant évident que cette assurance ne peut jamais être donnée avec une certitude absolue. Il s'agit toutefois d'avoir une confiance suffisante dans les mesures et méthodes qui ont permis de porter un jugement sur l'état de l'ouvrage.

D'autre part, la construction d'un pont représente une dépense élevée pour la collectivité publique. Ne pouvant que difficilement être rentable en tant que tel, l'ouvrage ne peut jamais être considéré comme économiquement amorti. Le propriétaire a donc intérêt à ce que celui-ci dure jusqu'à ce que son remplacement soit justifié par les paramètres qui ont déterminé sa construction, à savoir la charge et le volume de trafic à supporter. Il est donc nécessaire d'effectuer les travaux d'entretien courant propres à assurer la pérennité de l'ouvrage. Ils devront être suffisamment modestes pour éviter une disproportion entre frais d'exploitation et investissement consenti à la construction, mais assez complets pour éviter que la dégradation de certaines parties non entretenues nécessite de coûteux travaux de réparation [1, 2, 3, 4, 5]¹.

La surveillance d'un pont vise donc deux objectifs [6]:

- mettre en évidence les parties d'ouvrage nécessitant un entretien particulier ;
- déceler suffisamment tôt les désordres structuraux risquant de mettre en danger la sécurité globale de l'ouvrage.

Une auscultation détaillée de l'ouvrage permettra, le cas échéant, de déterminer l'origine des dérangements et de procurer les éléments nécessaires à la formation d'un diagnostic relatif à l'« état de santé » de l'ouvrage. Les éventuels travaux de réparation en seront la suite logique.

2. Bases de la surveillance

Les travaux de surveillance, d'entretien et de réparation sont donc intimement liés, l'entretien et les réparations étant dictés par les résultats de la surveillance. Une relation étroite doit exister entre les organismes chargés de la surveillance et ceux chargés de l'entretien, basée sur l'échange mutuel total des informations relatives à l'ouvrage.

On distingue trois niveaux de surveillance [10]:

- l'inspection périodique ;
- l'inspection de routine ;
- l'inspection spéciale.

L'inspection périodique doit permettre de dresser un bilan complet de l'état de l'ouvrage. Elle est effectuée par une équipe spécialisée et compétente en la matière, sous la responsabilité d'un ingénieur (ingénieur responsable de la surveillance et de l'entretien des ouvrages d'art).

Les inspections de routine ont pour but de déceler à temps toute défectuosité apparente pouvant conduire à des accidents ou entraîner des dégâts plus importants si l'on n'y remédie pas dans des délais assez courts. Les inspections de routine sont intercalées entre les inspections périodiques et sont généralement effectuées par le personnel du service d'entretien des routes.

Une inspection spéciale doit être effectuée lors de changements importants intervenant dans l'état, le comportement ou le degré de sollicitation de l'ouvrage. L'inspection spéciale a généralement un caractère complémentaire et nécessite le plus souvent la participation de spécialis-

Überwachung von Brücken

Die Brücken stellen einen wichtigen Bestandteil der Verkehrsnetze dar. Eine definitive oder auch eine zeitlich begrenzte Ausserbetriebsetzung ziehen in der Regel schwerwiegende Folgen nach sich.

In der Schweiz wurde in den letzten 30 Jahren das Strassennetz wesentlich erweitert. Dieser Konstruktionsphase, die noch in geringerem Umfang weiterläuft, wird eine Phase der Konsolidierung folgen, in der eine möglichst reibungslose Nutzung und eine Werterhaltung gewährleistet werden müssen.

Die Überwachung eines Brückenbauwerks soll den Verantwortlichen jederzeit einen Überblick über dessen Zustand und dessen Gebrauchsverhalten geben. Ist der Zustand zufriedenstellend, muss ein ordentlicher Unterhalt diesen so lange als möglich bewahren. Ist der Zustand jedoch mangelhaft oder besteht die Gefahr, dass Mängel auftreten, so sind die entsprechenden Massnahmen zu treffen, um die Sicherheit der Benützer und die Gebrauchsfähigkeit des Bauwerks zu gewährleisten.

Eine sorgfältig durchgeführte Überwachung hat somit zum Ziel, Mängel möglichst frühzeitig festzustellen und die sich aufdrängenden Entscheide zu treffen.

Nach einer kurzen Einführung in die Probleme der Überwachung von Brückenbauwerken werden die wichtigsten Kontrollmethoden mit ihren Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt. Dieser Überblick wurde ausgearbeitet am Institut für Massivbau der ETH Lausanne, im Rahmen eines Forschungsauftrags des Bundesamtes für Strassenbau « Überwachungskonzept für Brückenbauwerke ».

tes et l'utilisation d'un matériel de mesure particulier.

3. Ampleur des contrôles

Le problème de base est de définir l'ampleur à donner à l'inspection périodique. Doit-on se contenter d'une inspection visuelle sommaire tous les dix ans ou faut-il entreprendre un contrôle détaillé, avec un matériel sophistiqué, tous les six mois? (Fig. 1.)

La solution idéale se situe entre ces deux extrêmes.



Fig. 1. — L'inspection des ouvrages doit être régulière.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

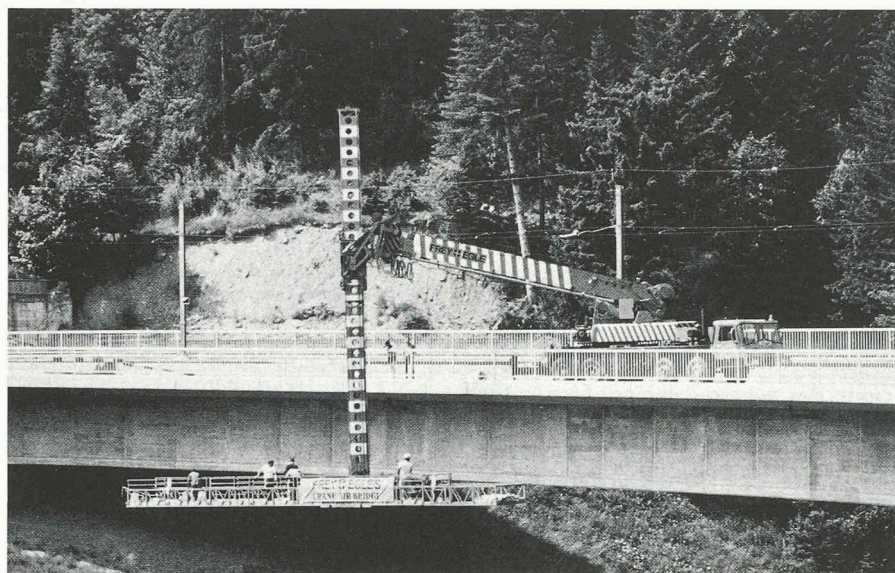


Fig. 2. — Passerelle mobile de visite.

Le propriétaire de l'ouvrage est responsable de l'exécution des contrôles. Il a une grande liberté pour en fixer les intervalles et les modalités.

Contrairement à certains pays où la gestion de la quasi-totalité des ponts est sous la responsabilité d'un ministère central et où il a été possible d'émettre des directives [11, 12], la réglementation reste en Suisse du ressort des cantons. Ils sont aidés dans cette tâche par des directives des offices fédéraux concernés [7] et par la norme SIA 160 [8]. Cette norme est actuellement en révision et les chapitres concernant la mise en service, la surveillance et l'entretien seront remaniés et regroupés dans une recommandation SIA 169 à paraître [10].

Quant aux genres de contrôles à effectuer, on les trouve décrits dans des docu-

ments tels que, par exemple, la directive 3 de la norme SIA 160 [9], également en révision. L'ingénieur responsable de la gestion des ponts a toutefois l'entière liberté d'établir un cahier des charges pour les personnes effectuant l'inspection.

Il serait difficile de vouloir établir une liste impérative de tous les points à contrôler et des moyens à utiliser si l'on voulait qu'elle s'applique à tous les ouvrages.

Ceux-ci sont en effet presque tous des exemplaires uniques et il est ardu de déterminer a priori les endroits où des défauts pourraient apparaître. On procédera donc à l'inspection d'un pont avec une grande minutie et en évitant les préjugés sur la «santé» de telle ou telle partie de l'ouvrage.

On peut toutefois regrouper les contrôles à effectuer lors d'une inspection périodique en trois catégories qui ne peuvent cependant pas, prises individuellement, donner une image suffisamment complète de la qualité de l'ouvrage.

En fonction de ce que l'on veut observer et du matériel qu'on doit engager, on peut distinguer :

- le contrôle de l'état de l'ouvrage ;
- le contrôle du comportement de l'ouvrage ;
- les contrôles particuliers de certaines parties de l'ouvrage.

4. Etat de l'ouvrage

Le contrôle détaillé de l'état de l'ouvrage s'effectue essentiellement de manière visuelle, quelques appareils de mesure pouvant faciliter le travail. L'inspection visuelle constitue une base indispensable à toute auscultation d'ouvrage. Elle permet d'appréhender simultanément de nombreux paramètres.

La recherche de défauts apparents et leur interprétation demandent cependant de la part du contrôleur une expérience certaine. Seule une bonne connaissance des propriétés des matériaux et du comportement des structures peut permettre de détecter, sur la base d'un indice souvent à peine visible, un défaut caché plus important [13].

L'inspection visuelle de l'ouvrage demande une attention soutenue et ne doit pas être bâclée dans un temps minimum. Elle ne doit pas se limiter qu'aux parties d'ouvrage visibles de la chaussée. Elle doit s'étendre à la totalité de l'ouvrage et cela pose le problème majeur de l'accessibilité. Si l'inspection visuelle de l'inté-

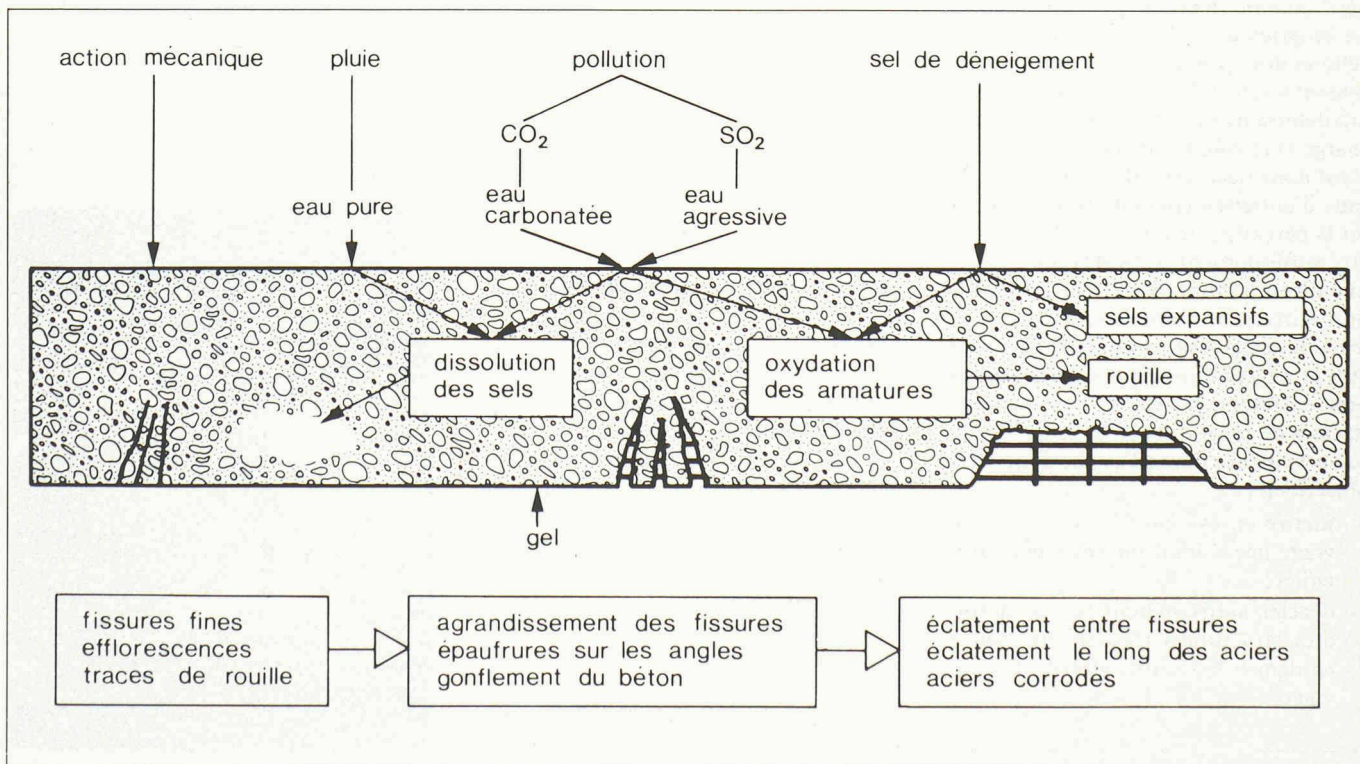


Fig. 3. — Evolution de la dégradation du béton.

rieur d'un caisson est relativement aisée, elle sera plus difficile pour l'extérieur de ce même caisson ou dans le cas d'un pont à poutres. Rares sont les ouvrages offrant des facilités dans ce domaine (passerelle de visite). Le contrôleur devra alors s'équiper d'une lunette puissante, faire monter un échafaudage ou s'assurer les services d'une passerelle de visite mobile (fig. 2). Dans tous les cas, l'utilisation d'un moyen d'éclairage puissant est nécessaire.

Dans le cadre d'une inspection périodique, on portera un jugement sur l'état de l'ouvrage en appréciant :

- la qualité des matériaux;
- l'état de fissuration;
- l'état des équipements;
- l'état de l'infrastructure.

4.1 Qualité des matériaux

Il s'agit de détecter les modifications intervenues depuis la construction ou la précédente inspection (fig. 3).

Il peut s'agir :

- d'éclatement ou de déformation sous l'effet d'un choc ou d'un écrasement;
- de modification de section d'éléments métalliques sous l'effet de la corrosion (réduction d'épaisseur, perforation, foisonnement);
- d'écaillage ou d'épaufrure du béton, à attribuer aux variations climatiques ou à une expansion à l'intérieur de la masse;
- de descellement ou de désintégration d'éléments de maçonnerie;
- de pourriture du bois.

Il est nécessaire de se demander dans chacun de ces cas si la capacité portante de l'élément a été affectée ou si elle peut l'être à plus ou moins long terme. Il faut notamment se rendre compte si les aciers, passifs ou de précontrainte, ont été ou risquent d'être mis à nu et de ce fait soumis à une corrosion accélérée. Un dégarnissage local de la zone concernée, à l'aide d'un marteau, doit permettre de se faire un image précise de l'étendue des dégâts.

La mesure des dimensions géométriques de la zone affectée est problématique,

mais nécessaire si l'on veut pouvoir déterminer la capacité portante résiduelle.

L'épaisseur de recouvrement des armatures peut être estimée à l'aide d'un pachomètre, mais il faut utiliser les résultats avec circonspection, le diamètre des armatures jouant un rôle important dans cette méthode électro-magnétique.

Il peut également s'agir de modification de la texture ou de l'état de surface des matériaux :

- efflorescence du béton (fig. 4);
- taches d'humidité, suintements;
- traces de rouille (fig. 5);
- stalactites;
- poussierage (apparition de matériaux poreux à la surface du béton durci);
- cloques de la peinture.

Ces défauts sont généralement les symptômes de problèmes dans l'épaisseur de la structure (corrosion des aciers, fissuration, défaut d'étanchéité du tablier, circulation d'eau le long d'une gaine de précontrainte...).

S'il n'est pas immédiatement possible de porter un jugement sur la gravité du défaut, il est possible de déterminer son étendue et ses répercussions sur la qualité de la matière en procédant à des mesures de dureté avec un scléromètre. Il faut cependant effectuer de nombreuses mesures et il est préférable de travailler en valeurs relatives (comparaison avec des mesures sur des zones réputées saines) qu'en valeurs absolues (appareil étalonné).

D'autres dégâts sont plus directement appréciables et il importe d'en faire un relevé détaillé :

- aciers d'armature mis à nu ou rompus (fig. 6);
- gaines de précontrainte abîmées ou rouillées;
- soudures ou boulons rompus;
- ancrages ou cachetages abîmés.

Dans tous les cas, il est nécessaire de faire une description et un relevé sur plan des dégâts constatés. Il est intéressant d'en faire une photographie et il est utile de le délimiter sur la structure elle-même



Fig. 4. — Efflorescence du béton.

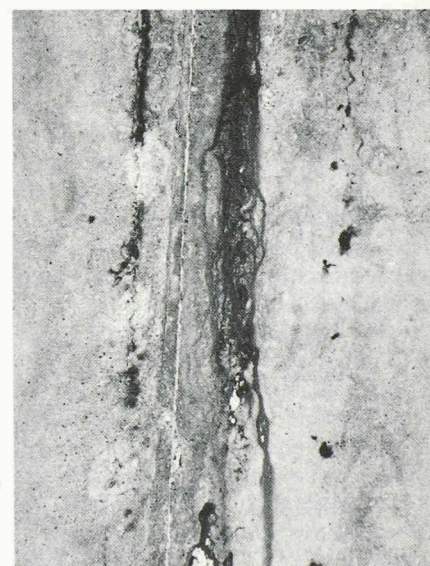


Fig. 5. — Traces de rouille.

(trait au crayon-feutre et date) afin de repérer l'évolution ou les nouveaux dégâts lors d'inspections ultérieures.

4.2 Fissuration

Le béton armé est un matériau fissuré. Les fissures doivent cependant corres-

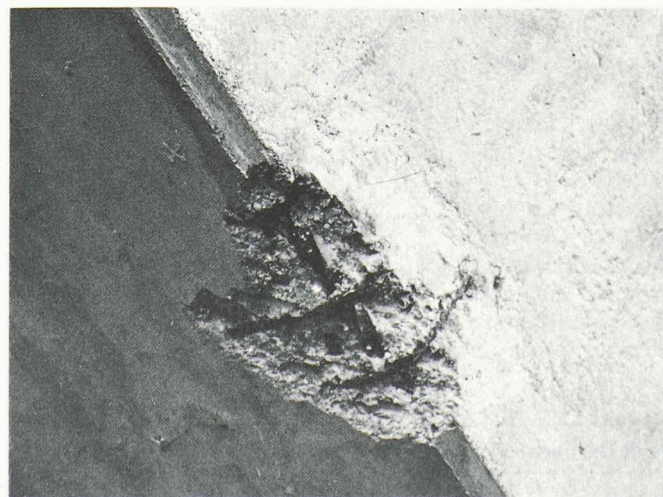


Fig. 6. — Eclatement du béton par expansion de la rouille des aciers.

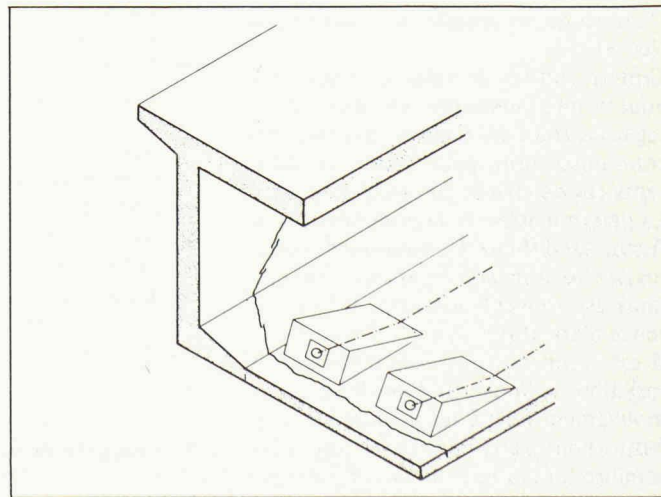


Fig. 7. — Fissure d'entraînement.

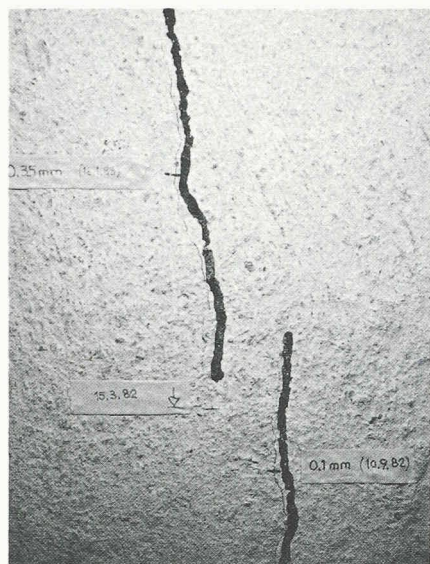


Fig. 8. — Marquage d'une fissure pour faciliter l'observation de l'évolution.

pondre à un schéma statique connu et présenter des ouvertures admissibles pour la protection des armatures (max. 0,2 à 0,4 mm, voire moins dans les zones exposées) et la durabilité de l'ouvrage. L'apparition de fissures ne correspondant pas à la déformation normale et attendue de l'ouvrage ou présentant des ouvertures excessives est le signe de sollicitations nouvelles dans la structure.

L'inspecteur doit être à même de discerner l'importance des différents types de fissures. Il ne faut pas mettre sur un pied d'égalité une fissure de retrait au droit d'une reprise de bétonnage et une fissure courant le long d'un câble de précontrainte (fissure de diffusion). Certaines fissures sont cependant caractéristiques (fig. 7).

Lorsqu'on constate l'existence d'une fissure (il est difficile d'en voir l'apparition en tant que telle), il est nécessaire :

- de la tracer sur l'ouvrage :
 - a) souligner le tracé au crayon-feutre,
 - b) dater les extrémités,
 - c) marquer l'ouverture apparente ;
- de la relever sur un plan en la mettant en regard du tracé de l'armature passive et de précontrainte.

C'est ce qu'on appelle la *fissurographie* (fig. 8).

L'interprétation de l'état de fissuration pourra être améliorée en mettant en regard le tracé des fissures et le tracé des contraintes principales issues de différents cas de charge du calcul statique.

La détermination de la profondeur de la fissure est difficile. L'utilisation de mesures de vitesse du son en surface (voir plus loin) est souvent perturbée par la présence d'armatures.

Il est cependant très utile d'observer la variation de l'ouverture des fissures. Le mouvement relatif des deux lèvres de la fissure pourra être mesuré avec un extensomètre mécanique ou, si l'on veut des mesures en continu, avec un capteur inductif de déplacement. On parle de

fissurométrie [14]. Il faut toutefois une longue série de mesures pour pouvoir discerner l'augmentation effective de l'ouverture du mouvement dû aux variations de température (« respiration »).

4.3 Etat des équipements

Un appareil d'appui bloqué ou ne fonctionnant pas correctement peut entraîner le développement d'efforts non prévus dans la structure. Inversement, une déformation plus importante que prévue sera généralement le signe de désordres structuraux.

Il est donc important de s'assurer :

- de l'absence d'engrassement des appuis (par débris ou rouille) ;
- du respect des limites de déformation fixées par le constructeur.

Un contrôle visuel est donc prioritaire, mais il est simple d'installer un système géométrique gradué pour suivre l'évolution des mouvements.

Le problème est similaire au niveau des joints de dilatation. Il est de plus important que l'ancrage des joints dans le pont et la culée soit en bon état, les importants effets dynamiques développés à cet endroit rendant très vite le béton pulvérisent.

Un aspect qu'il ne faut pas négliger est celui de l'évacuation des eaux. Un mauvais fonctionnement ou des débordements peuvent causer de graves dommages à l'ouvrage, voire constituer un danger pour le trafic. Il est donc judicieux de procéder à des contrôles réguliers, particulièrement en cas de fortes pluies ou de dégel.

4.4 Etat de l'infrastructure

L'infrastructure représentant l'assise de l'ouvrage, il est important d'assurer les contrôles nécessaires à la stabilité de l'ensemble.

Si on laisse de côté le problème des terrains instables demandant un système de contrôle adapté à chaque cas particulier, il faudra faire une inspection, essentiellement visuelle, des aspects suivants :

- accumulation d'eau derrière les murs de culée ;
- obturation des drains et barbacanes ;
- affouillement des fondations en site aquatique ;
- dégradation du béton sous l'effet d'eaux agressives ;
- pression des terres contre des éléments non dimensionnés en conséquence (béquilles enterrées).

Un élément qu'il est judicieux de contrôler est le gabarit d'espace libre. De nombreux facteurs peuvent le modifier entre deux inspections périodiques, sans que les responsables de ces modifications aient pris garde au problème.

5. Comportement global de l'ouvrage

L'inspection visuelle d'un ouvrage d'art doit permettre de détecter un certain

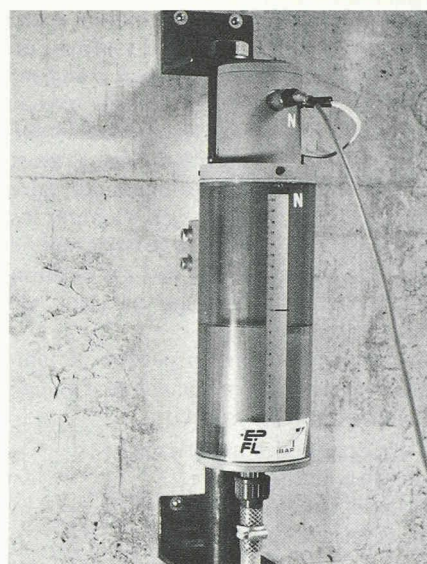


Fig. 9. — Système de nivellement hydrostatique (mesure électrique du niveau d'eau).

nombre de défauts apparents. Il s'agira cependant, dans la majeure partie des cas, de défauts très localisés. Il est donc utile de voir s'ils ont une répercussion sur le comportement mécanique de la totalité de l'ouvrage, risquant par là d'entraîner des dégâts en d'autres endroits. Inversement, une modification du comportement mécanique de l'ouvrage pourra être le révélateur de défauts cachés ou que l'inspection visuelle n'avait su détecter.

Trois groupes de méthodes peuvent entrer en ligne de compte pour l'étude du comportement global d'un pont dans le cadre d'une surveillance périodique :

- le suivi topographique ;
- le suivi dynamique ;
- le suivi des réactions d'appui.

Ces méthodes permettent de détecter soit une modification, locale ou généralisée, de la rigidité de l'ouvrage, soit une redistribution des efforts intérieurs.

5.1 Suivi topographique

La surveillance topographique permet de suivre l'évolution de l'état à vide d'un ouvrage. Elle peut indiquer une évolution fâcheuse avant que celle-ci ne se concrétise par des dégâts à la structure. C'est le cas de déformations à long terme du tablier, de tassements d'appuis ou de flexion transversale des sections.

Les déplacements verticaux et les rotations sont les deux types de déformations à suivre. L'implantation des points de mesure doit être adaptée au type de structure et aux possibilités de réaliser la mesure. Il faudra en tout cas prévoir des points sur appui et à mi-portée. Dans le cas d'arcs ou de grandes portées, on en intercalera aux quart et trois quarts de portée. Quant à la répartition transversale dans chacune de ces sections, il faut, dans la mesure du possible, placer les points de mesure au droit de la structure porteuse longitudinale ; on pourra implanter des points de mesure supplémen-

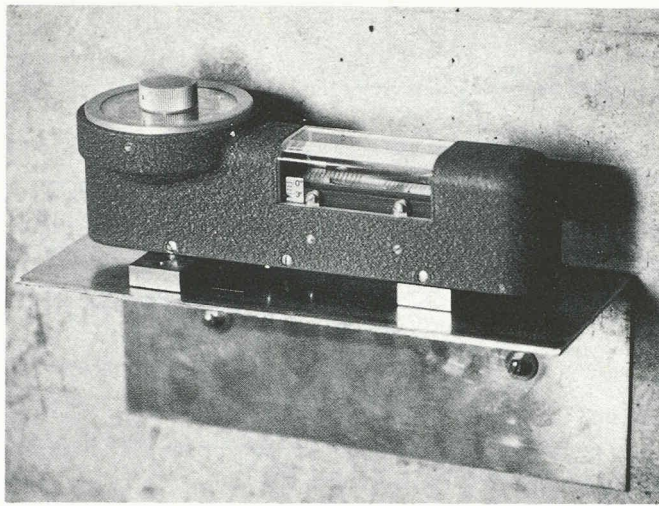


Fig. 10. — Clinomètre mécanique (à niveau).

taires en fonction de la densité d'informations que l'on veut obtenir. Les techniques de mesure elles-mêmes sont des méthodes classiques de topographie:

- nivellement optique (sur le tablier ou dans le caisson);
- nivellement hydrostatique (vases communicants) (fig. 9);
- clinomètre à niveau (mesure de pente) (fig. 10);
- clinomètre électrique.

La température ambiante et les gradients de température dans la structure sont des paramètres qui jouent un grand rôle sur les déformations des structures hyperstatiques. Il faut en tenir compte dans le dépouillement et l'interprétation des résultats. Ces paramètres variant d'une mesure à l'autre, ils font fluctuer les résultats, donnant ainsi une image de la «respiration naturelle» de l'ouvrage. Une des grandes difficultés du suivi topographique d'un pont réside dans l'interprétation des résultats. En effet, un ouvrage se déforme longtemps sous l'influence des effets différés (fluage du béton, relaxation des aciers de précontrainte...). Il faut compter de cinq à dix ans avant que cela ne soit plus sensible dans les mesures. La difficulté est donc de dissocier ces déformations, qui résultent d'un comportement attendu de la structure composite, des déformations

caractérisant un défaut interne. Cela suppose qu'il faut prévoir les déformations dues aux effets différés afin d'épurer la mesure.

L'interprétation des résultats d'un nivellement périodique devra donc se faire avec beaucoup de prudence, notamment au moment de fixer la «cote d'alerte», déformation déclenchant un processus d'auscultation approfondi (fig. 11).

5.2 Suivi dynamique

Un pont peut être caractérisé par des paramètres dynamiques: fréquences propres et amortissement. Tous deux dépendent de la rigidité de l'ouvrage.

L'accélération verticale de l'ouvrage, la vitesse de déplacement vertical et le déplacement vertical sont les grandeurs physiques qui peuvent être mesurées. Ces valeurs sont saisies individuellement, ou simultanément, ou par intégration de l'une par rapport à l'autre.

L'excitation provoquant les vibrations dans l'ouvrage se différencie en trois groupes:

- l'excitation harmonique consiste à mettre le pont en résonance en balayant une bande de fréquences à l'aide d'un vibreur lourd. Cela nécessite un temps considérable et une fermeture du pont au trafic; d'autre part, le matériel est très lourd et encombrant;

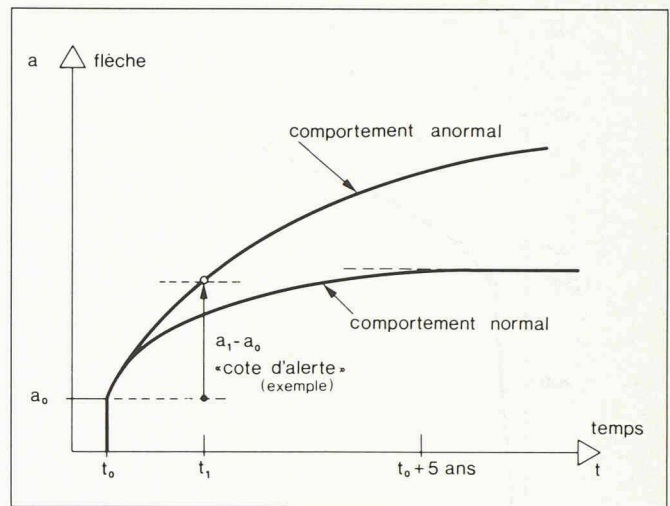


Fig. 11. — Interprétation du suivi topographique.

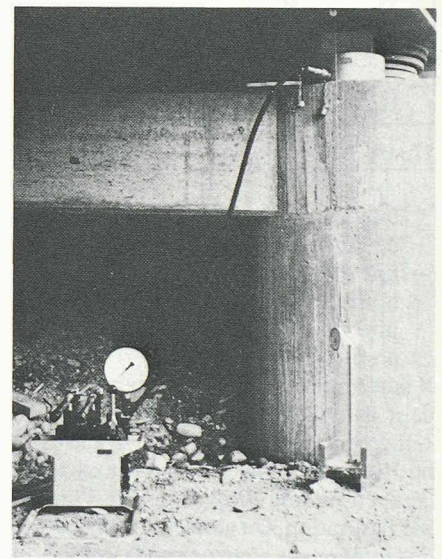


Fig. 13. — Soulèvement d'appui.

- la mesure de la réponse libre de l'ouvrage, c'est-à-dire la mesure des vibrations résiduelles après que la cause extérieure ait cessé (fig. 12). Cela peut être l'effet d'un choc (masse tombant d'une certaine hauteur, essieu de camion tombant d'une planche...) ou du trafic routier, lorsque des véhicules lourds ont circulé sur le pont et l'ont quitté; cela nécessite une régulation du trafic;
- l'excitation aléatoire consiste à laisser l'ouvrage ouvert au trafic normal. Cela peut présenter un avantage lors de l'étude d'un pont à plusieurs travées: on obtient ainsi l'excitation simultanée de tout l'ouvrage.

L'analyse des résultats donne des renseignements intéressants [15]:

- le spectre des fréquences des vibrations mesurées dans une travée doit donner les fréquences propres de toutes les travées de l'ouvrage et deux travées adjacentes doivent avoir un déphasage de 180° . Un spectre des fréquences perturbé et un déphasage aléatoire seront le signe d'un défaut dans la continuité;
- une augmentation de la fissuration provoque une diminution de la fré-

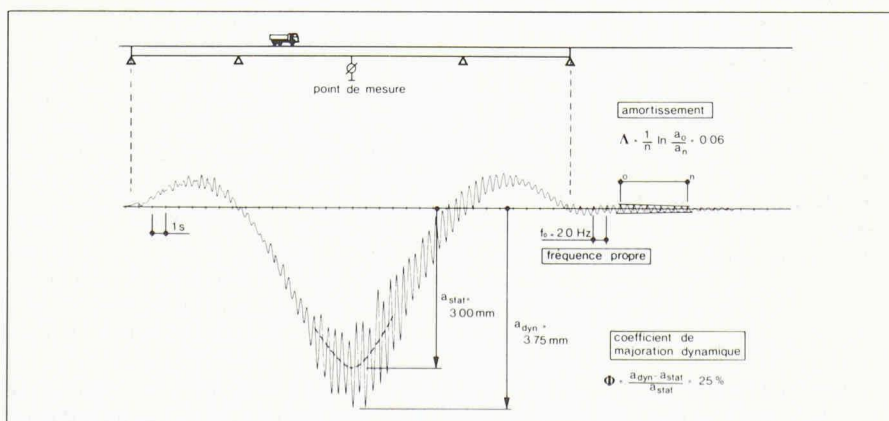


Fig. 12. — Vibrations d'un pont au passage d'un camion et détermination des caractéristiques dynamiques.

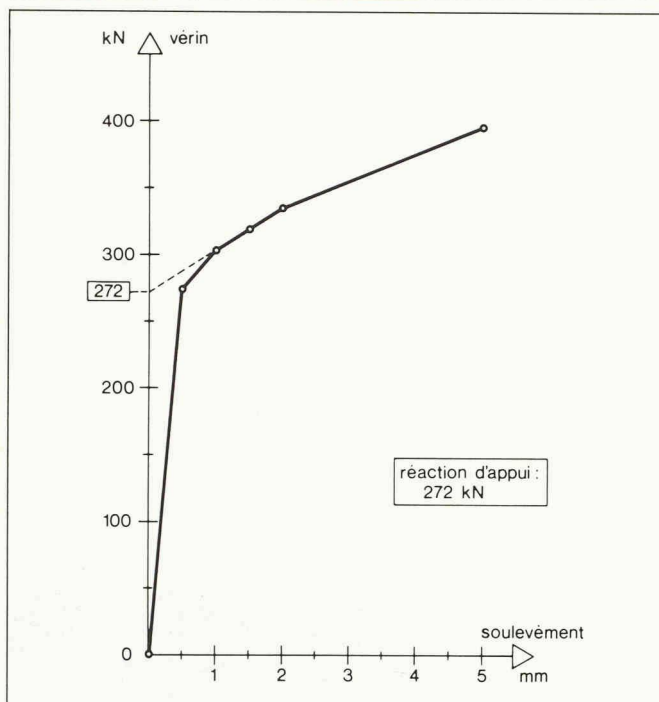


Fig. 14. — Détermination de la réaction d'appui.

quence propre et une augmentation de l'amortissement ;

- une diminution de la force de précontrainte peut avoir pour conséquence une diminution de la fréquence propre.

Il faut cependant être également très prudent dans l'interprétation des résultats. L'augmentation du module d'élasticité du béton avec l'âge pourra par exemple compenser une diminution de l'inertie par fissuration. Ou alors, une diminution de température augmentera la rigidité du revêtement et, par conséquent, de tout l'ouvrage.

L'analyse des résultats est très délicate car les modifications des caractéristiques dynamiques sous l'effet de dégradations sont très faibles et souvent proches de la précision des mesures.

5.3 Réactions d'appui

Une des méthodes permettant de déceler des modifications dans la répartition des efforts internes d'une structure hyperstatique consiste à mesurer les réactions d'appui [14].

Si l'on veut assurer la stabilité de la mesure à long terme, il faut disposer d'un matériel permettant l'intégration d'un capteur de force dans l'appui. Il est souhaitable de pouvoir le réétalonner périodiquement.

Une autre solution consiste à soulever progressivement le pont, au droit de l'appui (des emplacements pour les vérins devraient être prévus pour permettre les changements des appareils d'appui) (fig. 13), et à mesurer simultanément la force nécessaire et le soulèvement. La courbe devient rectiligne lorsque les liaisons parasites internes à l'appui sont libérées et, par extrapolation à soulèvement nul, on peut obtenir la réaction cherchée (fig. 14).

Il faut prendre garde à ne pas trop soulever le pont, risquant par là de créer l'équivalent d'un tassement différentiel ou d'amener des dégâts mécaniques dans l'appareil d'appui.

Un élément important est la présence des efforts hyperstatiques dus aux gradients thermiques et qui peuvent entraîner une variation sur 24 heures allant jusqu'à 25% de la valeur de base. Il faut donc mesurer ce gradient de température et effectuer une série de mesures de la réaction d'appui, à plusieurs heures d'intervalle, et obtenir une valeur théorique pour un gradient nul.

L'interprétation des résultats est cependant délicate, car les éléments qui nous intéressent ne sont pas tant les réactions d'appui prises en valeurs absolues que leurs variations. Celles-ci sont souvent voisines de la précision des mesures.

6. Méthodes particulières de contrôle

Un certain nombre d'autres méthodes peuvent être utilisées pour la surveillance. On les applique cependant généralement en phase d'auscultation, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de confirmer par des mesures plus approfondies des soupçons émis par des méthodes de mesure simples.

Il est cependant certain que quelques-unes de ces méthodes, moyennant une systématisation dans l'emploi des appareils, pourraient entrer sans autre dans la panoplie des moyens de l'inspection périodique.

6.1 Détermination de la corrosion et de la carbonatation

Exposé à l'air humide, l'acier de construction se corrode rapidement.

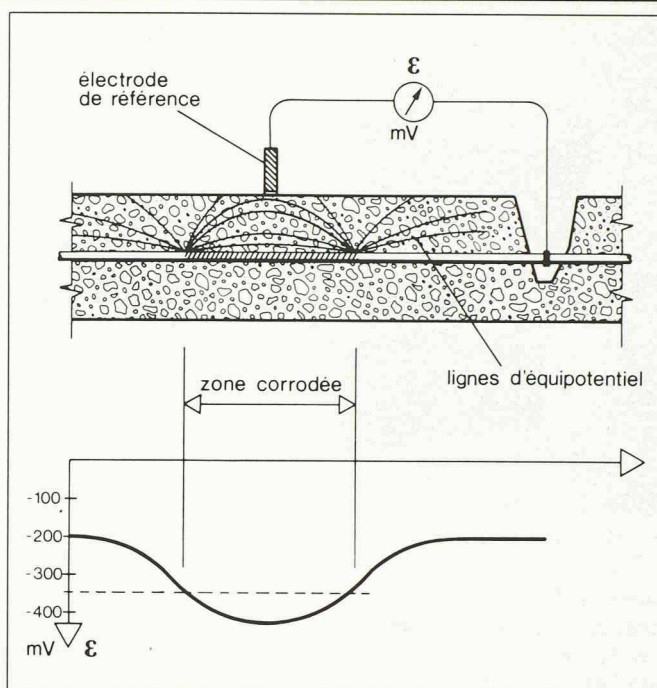


Fig. 15. — Principe de la mesure du potentiel électrochimique pour la détermination des zones corrodées.

La corrosion d'une structure métallique peut être aisément détectée (inspection visuelle, coups de marteau...).

Les armatures noyées dans le béton jouissent d'une protection naturelle: l'eau incluse dans les pores du béton a un pH très élevé (>12,5). Il se forme alors sur l'acier une couche d'oxyde protectrice et il ne rouille pas. Le recouvrement de béton protège cette pellicule d'agressions mécaniques.

Deux causes peuvent tout de même entraîner la rouille de ces armatures :

- des substances agressives (notamment les chlorures provenant du sel de déverglaçage des chaussées) peuvent pénétrer jusqu'à l'acier, d'autant plus facilement si le béton est de mauvaise qualité ou son épaisseur insuffisante, et déclencher la corrosion même en milieu à pH élevé ;
- l'atmosphère polluée par l'industrie ou les gaz d'échappement des voitures a une teneur élevée en CO_2 et SO_2 . La combinaison du gaz carbonique avec l'hydroxyde de calcium du béton produit du carbonate de calcium et fait baisser le pH. C'est ce qu'on appelle la carbonatation du béton. Il se crée une différence de potentiel entre la zone carbonatée et les zones saines. Lorsque la carbonatation atteint les aciers, ceux-ci commencent à rouiller.

Il faut être conscient du fait que la carbonatation ne représente pas un danger pour le béton lui-même, dont elle améliore même les caractéristiques mécaniques, mais essentiellement pour la protection des aciers.

On peut déterminer la profondeur atteinte par la carbonatation [16] en piquant le béton sur une certaine épaisseur et en pulvérisant une solution de

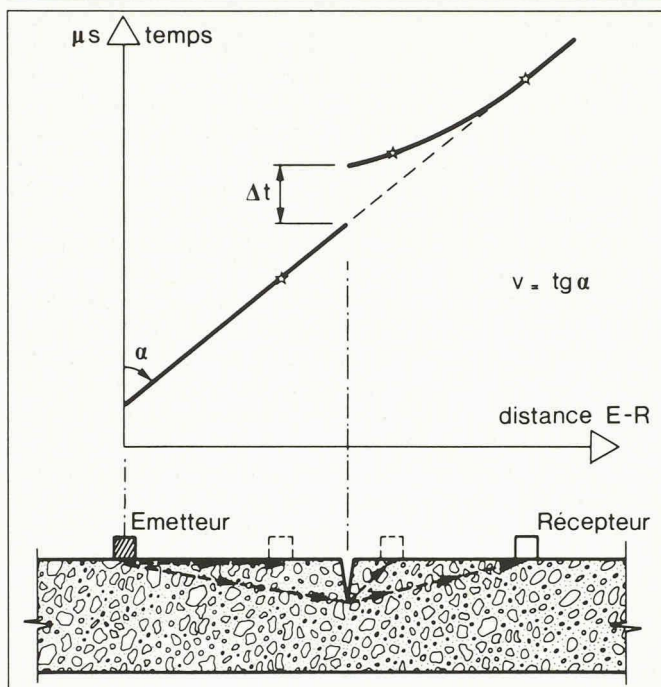


Fig. 16. — Détection d'une fissure par mesure de la vitesse du son.

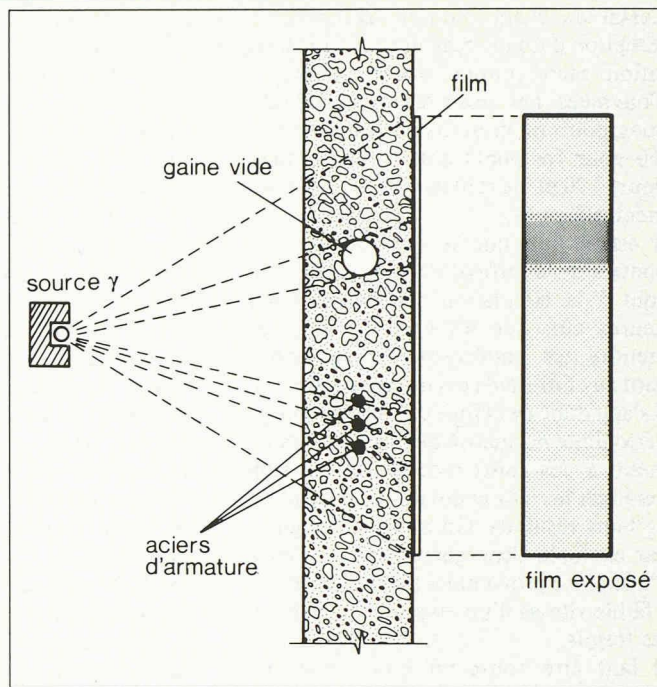


Fig. 18. — Principe de la gammagraphie.

phénolphthaléine. Le béton sain se colore en rouge tandis que le béton carbonaté ne change pas de couleur. Dans les zones fissurées, la profondeur de carbonatation sera plus importante, la surface en contact avec l'air étant plus grande.

On peut mesurer la probabilité de corrosion des aciers par la mesure du potentiel électrochimique entre une barre de l'armature et la surface du béton [17] (fig. 15). Cette méthode est plus qualitative que quantitative et permet de déterminer les zones susceptibles d'être atteintes. Elle a le désavantage de nécessiter le dégagement d'un tronçon d'une barre d'armature.

Une mesure de la vitesse de corrosion est encore plus intéressante. Des recherches sont actuellement en cours [17] pour la mise au point d'un système permettant de déterminer la résistance de polarisation par mesure de l'impédance et d'en tirer la quantité d'acier transformé en rouille en un certain temps.

Un aspect important doit cependant être mis en évidence : les cas de corrosion des armatures par suite de carbonatation du béton sont considérablement moins nombreux que ceux où la corrosion est la conséquence d'une fissuration du béton ou d'une épaisseur d'enrobage insuffisante.

6.2 Mesure de la vitesse du son

Il est possible d'effectuer des mesures de la vitesse de propagation du son dans le béton durci. C'est ce qui est désigné en France sous le terme de «auscultation dynamique».

Théoriquement, ce procédé doit permettre de mesurer le module d'élasticité E , mais, de fait, on trouve une valeur plus grande de près de 40% (module d'élasticité dynamique).

Le procédé est surtout utilisé pour :

- déterminer l'homogénéité du matériau ;
- localiser et apprécier l'étendue d'un défaut.

On mesure le temps nécessaire à une onde ultrasonique pour parcourir la distance, connue, entre un émetteur et un récepteur. On en tire la vitesse de propagation.

Deux positions relatives de l'émetteur et du récepteur sont possibles :

- en transparence ;
- en surface.

La méthode de mesure par transparence qui, théoriquement, serait meilleure, présente un certain nombre de désavantages d'ordre pratique :

- difficulté de mettre émetteur et récepteur en face l'un de l'autre ;
- imprécision de la distance les séparant ;

- difficulté de relier les deux têtes de mesure au chronomètre à quartz.

On utilisera donc de préférence la méthode de mesure en surface (fig. 16). Comme pour l'utilisation du scléromètre, il est préférable de juger les résultats par comparaison avec des zones saines plutôt que de vouloir apprécier les valeurs absolues des vitesses mesurées. On peut toutefois mentionner qu'un béton de qualité doit donner des vitesses supérieures à 4000 m/s.

6.3 Essais de charge

Un essai de charge a pour but :

- de mesurer les déformations de l'ouvrage sous une charge connue et, partant, de les comparer à celles obtenues par le modèle de calcul ;
- d'étudier la réversibilité de ces déformations, c'est-à-dire l'élasticité de la structure [18].

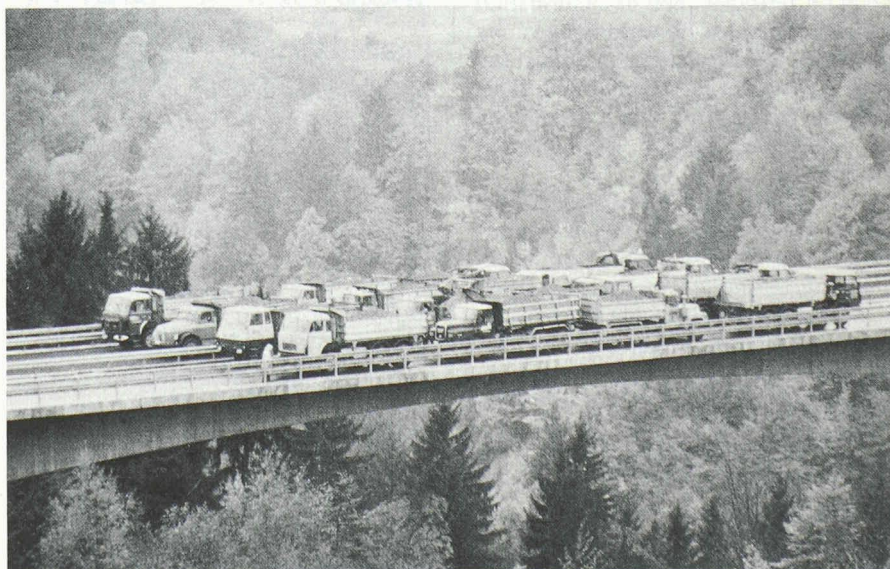


Fig. 17. — Essai de charge de réception d'un ouvrage neuf.

L'essai de charge comme partie de la réception d'un ouvrage neuf est une opération bien connue des propriétaires d'ouvrages. Les essais de charge périodiques, pourtant prescrits par la norme SIA 160 pour les ponts d'une portée supérieure à 20 m, ne sont par contre que rarement effectués.

Il est certain que le gestionnaire des ponts a de la difficulté à faire fermer un pont à la circulation durant plusieurs heures afin que les camions puissent prendre les emplacements correspondant aux différents cas de charge (fig. 17). Il s'agit donc de définir un essai de charge périodique normalisé qui soit fait rapidement, à des coûts modestes, sans trop déranger le trafic et qui donne cependant de bons résultats. On pourrait imaginer par exemple l'enregistrement de lignes d'influence provoquées par la circulation à faible vitesse d'un ou plusieurs véhicules lourds.

Il faut être conscient qu'un essai de charge est nettement plus riche en informations sur le comportement mécanique de l'ouvrage que des mesures faites à vide ou sous une charge de trafic aléatoire. En effet, les mesures de flèches, d'ouvertures de fissures, d'extensométrie... sont beaucoup plus significatives si l'on prend la variation entre un état à vide de l'ouvrage et un état chargé que si l'on fait la différence entre deux états à vide. On peut alors observer l'évolution de ces valeurs au fil des essais périodiques.

6.4 Autres méthodes

D'autres méthodes peuvent également être appliquées pour l'auscultation d'un pont. Cependant, de par l'ampleur que cela représente, elles ne seront utilisées que dans des situations très particulières et non pas dans le cadre d'une surveillance périodique.

L'état de contraintes peut être déterminé par la méthode de *libération des contraintes*. Il s'agit de procéder à une saignée dans le béton, d'y introduire un vérin plat, et d'augmenter la pression jusqu'à ce qu'on retrouve l'état de déformation initial. La pression du vérin donne alors la contrainte de compression en surface. Cette méthode n'est pas applicable dans les zones en traction. Elle a par ailleurs le désavantage d'être partiellement destructive.

La radiographie est bien connue pour le contrôle des soudures de structures métalliques. Elle est d'application beaucoup plus récente dans les structures en béton (fig. 18). Elle présente le gros avantage de permettre un contrôle de l'état des câbles de précontrainte (rupture, détorsadage, injection...), souci constant des gestionnaires de ponts. L'utilisation de sources radioactives (utilisation du rayonnement γ , d'où le terme utilisé de *gammagraphie*) [14] a permis de faire des clichés au travers d'une épaisseur de 80 cm de béton ; il faut cependant dans ce cas compter une durée d'exposition de

6 heures ! Le développement actuellement en cours d'une source basée sur accélérateur linéaire de particules permettra de passer au travers de 1,20 m de béton.

Les énergies mises en jeu sont telles que cela représente de nombreux problèmes au niveau de l'appareillage et de la sécurité.

D'autre part, la grandeur des clichés étant faible (environ 30 cm de côté), il faut un nombre considérable de prises de vue pour décrire tout un câble. Le coût devient rapidement élevé.

Un aspect non négligeable de cette méthode est la difficulté d'interprétation des clichés. Il est souvent très difficile de discerner certains défauts ou de faire la distinction entre différents types de dégâts (fig. 19).

On réservera donc cette méthode à des cas exceptionnels.

La *gammascopie*, par contre, peut permettre l'observation en continu (récepteur relié à un écran de visualisation). Son application in situ n'est cependant pas encore opérationnelle.

7. Concept de surveillance

Les ponts sont généralement des exemplaires uniques, des prototypes. Il est donc difficile d'élaborer une méthodologie de surveillance qui soit applicable sans autre à tous les ouvrages d'art. Cependant, si l'on veut rationaliser et rendre plus efficace la surveillance afin de minimiser les coûts d'entretien, il faut pouvoir disposer d'un schéma type de contrôles.

L'idéal serait de pouvoir détecter immédiatement toute anomalie ou modification du comportement ; il faut cependant se garder d'engager dans la surveillance d'un ouvrage a priori sain des moyens disproportionnés.

Une stratégie possible de surveillance est la suivante :

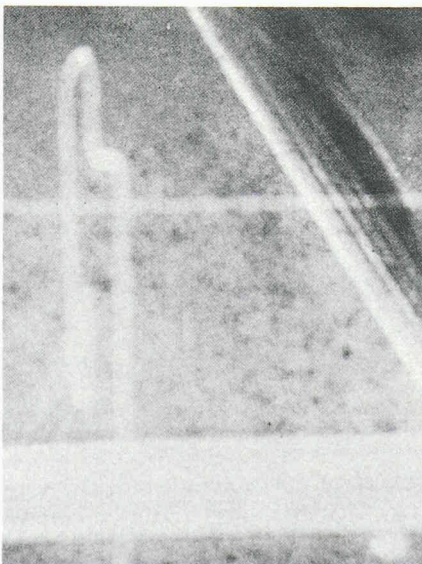


Fig. 19. — Exemple de cliché obtenu par gammagraphie.

A) *Inspection de routine* tous les quinze mois. Cela permet d'observer l'ouvrage à différentes périodes de l'année, sous différentes conditions climatiques. Elle est effectuée par le personnel de l'entretien des routes ayant reçu une formation complémentaire adéquate. Elle doit mettre en évidence, par l'intermédiaire d'un rapport à l'ingénieur des ponts, d'éventuels problèmes tels que :

- taches d'humidité ou venues d'eau ;
- déformations apparentes évidentes ;
- mauvais état ou dépassement des limites de fonctionnement admissibles des appareils d'appui ou des joints ;
- dégâts au système d'évacuation des eaux ;
- anomalies particulières : fissures larges, éclatements du béton, taches de rouille...

C'est sur cette base que l'ingénieur des ponts pourra planifier l'entretien courant.

B) *Inspection périodique* tous les cinq ans, sous la direction de l'ingénieur responsable de la surveillance des ponts et avec du personnel spécialement formé [19].

Il s'agit de procéder :

- au contrôle visuel détaillé comprenant notamment un relevé de l'état de fissuration, un relevé des taches d'humidité ou d'efflorescence... Pour ce faire, il nous semble judicieux de pouvoir disposer d'un maillage numéroté du pont, facilitant par là la désignation de l'emplacement d'une fissure, le relevé d'une anomalie et l'implantation d'un point de mesure ;
- au suivi topographique des déformations pour lequel on considérera au minimum les appuis et les mi-portées. Lorsque le rattachement externe est difficile, on se contentera d'une base interne à l'ouvrage ;
- au suivi du comportement en effectuant, sous trafic ou sous charge normalisée, soit un essai de charge restreint, soit des mesures dynamiques ;
- à l'inspection des appareils d'appui et des joints de dilatation. On profitera de cette occasion pour effectuer l'entretien soigné de ces appareils, selon les indications et en collaboration avec le constructeur.

C) *Inspection spéciale* suite à des changements importants de l'état, du comportement ou du degré de sollicitation de l'ouvrage. Elle aura pour but de définir les causes des dégâts constatés et se limitera donc à certaines parties du pont. Elle nécessitera le plus souvent la participation de spécialistes et l'utilisation d'un appareillage approprié. Elle doit permettre de définir si des travaux d'entretien courant suffisent à remettre l'ouvrage en état ou s'il faut entreprendre les études nécessaires à des travaux de réparation ou de renforcement plus conséquents.

L'exécution soignée et complète des inspections périodiques est fondamentale si l'on veut pouvoir, a posteriori, reconstituer la vie de l'ouvrage lors de l'analyse des causes de dégâts.

8. Conclusions

Durant ces vingt dernières années, la Suisse a considérablement augmenté son réseau routier. La construction des routes nationales et la modernisation des routes cantonales ont entraîné l'édification de nombreux ouvrages d'art.

A cette période de construction, qui va d'ailleurs se poursuivre, devra succéder une phase tout aussi importante durant laquelle il s'agira de maintenir le capital construit dans le meilleur état possible en engageant un minimum de frais. D'autres pays industrialisés ont suivi une évolution semblable à la nôtre, mais avec une légère avance dans le temps. Ils connaissent actuellement de graves problèmes en ce qui concerne l'état de certains de leurs ouvrages d'art.

Il est évident que le préalable à tout travail d'entretien est une surveillance régulière de l'ouvrage permettant de détecter les éléments pour lesquels des travaux doivent être entrepris. La surveillance d'une série de ponts doit faire l'objet d'une planification soignée et être effectuée par des personnes compétentes.

Si l'inspection périodique des éléments d'équipement (appuis, joints, canalisations...) est relativement aisée — bien que l'accès pour la visite ne soit pas toujours facile —, le contrôle du comportement et de l'état de la structure elle-même pose plus de problèmes. La surveillance de l'ouvrage doit permettre non seulement de s'assurer que la sécurité est suffisante, mais également de détecter assez tôt et de manière sûre les éléments de structure nécessitant une réparation. Le coût de ces travaux sera d'autant plus limité qu'ils pourront avoir lieu avant que la dégradation de l'ouvrage ait atteint un stade critique.

La base de la surveillance reste sans aucun doute le contrôle visuel. Il doit

Bibliographie

- [1] REY, E., *Le comportement des ponts routiers en service*. Colloque international sur la gestion des ouvrages d'art, Paris 1981.
- [2] WOYWOD E., *Überwachung und Unterhalt von Kunstbauten*. Schweizer Ingenieur und Architect n° 22/82.
- [3] STAMPF, W., *Sanierungsprobleme bei Brücken*. Schweizerbauwirtschaft n° 32/84.
- [4] WICKE, M., *Einige Langzeiterfahrungen mit Massivbrücken in Österreich*. Beton- und Stahlbetonbau, n° 6/83.
- [5] KÖNIG, G., *Instandhaltung von Brücken*. Séminaire Essen 84 — rapport interne non publié.
- [6] SUTER, R. et ANDREY, D., *Surveillance des ouvrages d'art*. Réunion des ingénieurs des ponts des services cantonaux, Saint-Gall, 1984.
- [7] Office fédéral des routes, *Cahier des charges modèle pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art*. Berne, 1979.
- [8] Société suisse des ingénieurs et architectes (SIA), *Norme SIA 160: Norme concernant les charges, la mise en service et la surveillance des constructions*, Zurich, 1970.
- [9] Société suisse des ingénieurs et architectes (SIA), *Directive 3 relative à la norme SIA 160: Inspection périodique des ponts*, Zurich, 1975.
- [10] Société suisse des ingénieurs et architectes (SIA), *Recommandation SIA 169: Mise en service, surveillance et entretien des ouvrages de génie civil*, à paraître 1985.
- [11] France, Ministère des transports, *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art*, Paris, 1979.
- [12] Belgique, Ministère des travaux publics, *Règlement concernant la gestion des ouvrages d'art*, Bruxelles, 1978.
- [13] ROMER, B., *Bausanierung und Substanzerhaltung*. Schweizer Ingenieur und Architekt, n° 14/84.
- [14] BOIS, C., *Auscultation des ouvrages d'art*, in Restauration des ouvrages et des structures, Presses de l'ENPC, Paris, 1983.
- [15] STIFKENS, J. et DEMARS, P., *Surveillance des ouvrages d'art par le suivi de leur comportement dynamique*. Colloque international sur la gestion des ouvrages d'art, Paris, 1981.
- [16] MERMINOD, C., *Les méfaits de la carbonatation du béton armé et ses remèdes*. Chantiers n° 2/81.
- [17] ELSENER, B. et BÖHNI, H., *Elektrochemische Untersuchung der Korrosion von Armierungsstahl in Beton*. Schweizer Ingenieur und Architekt n° 14/84.
- [18] SUTER, R. et FAVRE, R., *Conclusions des inspections et des épreuves de charge en Suisse*. Colloque international sur la gestion des ouvrages d'art, Paris, 1981.
- [19] LADNER, M., *Ausbildungsfragen*. Réunion des ingénieurs des ponts des services cantonaux, Saint-Gall, 1984.

cependant être fait de manière très systématique et en y consacrant le temps nécessaire. Un complément fort utile à ce contrôle visuel doit être apporté par des mesures instrumentées telles que le suivi topographique, le suivi dynamique ou un essai de charge restreint. Mais il faut rester réaliste et adapter le programme d'inspection à l'importance de l'ouvrage. Un des aspects importants de la surveillance est l'archivage des résultats des inspections. Il doit être effectué de manière telle qu'il soit en permanence possible de se faire une image de l'état de l'ouvrage et qu'on puisse y voir l'évolution des diffé-

rents éléments inspectés, particulièrement ceux dans lesquels on a détecté des défauts.

Adresse des auteurs :

Dominique Andrey, ing. civil dipl. EPFL
René Suter, Dr ès sc. tech.
Renaud Favre, prof. EPFL
Ecole polytechnique fédérale
de Lausanne
Institut de statique et structures —
Béton armé et précontraint (IBAP)
Génie civil
1015 Lausanne

Actualité

Les émissions de polluants atmosphériques en Suisse : proportion, évolution et mesures prises jusqu'à présent

En Suisse également, l'extension du dépérissement des forêts a mis en évidence, de manière sans équivoque, que la pollution atmosphérique a atteint dans notre pays une proportion qui menace sérieusement notre environnement, et partant, la santé humaine.

Pendant longtemps, la composition naturelle de l'atmosphère n'a guère changé.

Les cycles biogéochimiques dans l'eau, le sol et l'air n'étaient pas perturbés et les processus d'autoépuration empêchaient une accumulation de polluants dans l'air. Avec l'avènement de l'ère industrielle, les dégagements de gaz résultant des activités humaines augmentent progressivement. Des quantités énormes de polluants sont projetées chaque année dans l'atmosphère par les combustibles et les carburants fossiles dans le trafic motorisé, l'industrie et la production d'énergie.

Une vue d'ensemble détaillée de l'évolution des émissions de polluants atmos-

phériques en Suisse est actuellement en préparation. Les résultats des calculs provisoires effectués en rapport avec le dépérissement des forêts pour les principales substances nuisibles, anhydride sulfureux (SO₂), oxydes d'azote (NO_x) et hydrocarbures (HC), sont illustrés dans les figures ci-après.

D'une manière générale, on remarque que la pollution a considérablement augmenté en Suisse depuis les années 50. Si dès le début des années 70 les émissions d'anhydride sulfureux ont tendance à baisser, celles d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures poursuivent leur mouvement ascendant.

Les émissions suivantes de polluants atmosphériques (tonnes/année) ont été