

SCORPION

Bilan de dix ans d'utilisation

Robert GUINEZ
Ingénieur ENSM Nantes
Directeur Adjoint du Laboratoire régional
des Ponts et Chaussées d'Angers
(CETE de l'Ouest)

Présentation

Jean-Louis RICHARD
Directeur du Laboratoire régional
des Ponts et Chaussées de Blois
CETE Normandie-Centre

Jean-Pierre CHEVRIER
Chef du service Métrologie et instrumentation
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Résultat d'une idée de 1973, d'une recherche des années 1974 à 1982 et d'un développement de 1982 à 1986, le prototype « SCORPION » a été utilisé de façon opérationnelle pendant dix ans entre les années 1985 et 1995. Il a prouvé son utilité sur plus de 78 ouvrages importants et ainsi fortement contribué à la définition de la politique de surveillance des Viaducs à travées indépendantes à poutres en béton précontraint (VIPP). Cette politique va être prochainement matérialisée par la parution d'un guide méthodologique LCPC/SETRA.

Cet appareil présentait évidemment certains inconvénients d'un prototype : lourdeur d'emploi, nécessité de révisions fréquentes, coûts de fonctionnement et d'entretien élevés, etc. Il a néanmoins permis, grâce à l'appui de la Direction des routes et des sociétés d'autoroutes, d'ausculter pendant une dizaine d'années un bon nombre d'ouvrages susceptibles de présenter des désordres.

En combinant les enseignements de cette expérience avec les essais réalisés avec des mini-accélérateurs linéaires à guide d'onde souple et des mini-accélérateurs circulaires, on peut affirmer qu'il est possible de concevoir aujourd'hui un système beaucoup plus performant et beaucoup plus léger.

Cependant, si l'on souhaite assurer à un tel appareil une charge de travail raisonnable, compatible avec l'investissement que son étude et sa réalisation représentent, il semble qu'une telle opération ne puisse être envisagée qu'au niveau européen.

Il faudra, sans doute, attendre quelques années que le parc européen très important d'ouvrages en béton précontraint vieillisse encore pour poursuivre cette aventure technologique, dans le cadre d'un partenariat européen cette fois.

RÉSUMÉ

SCORPION est un système de radioscopie par rayonnement pour l'inspection des ouvrages en béton développé entre 1973 et 1984.

Opérationnel depuis 1985, il a permis d'ausculter de nombreux ouvrages susceptibles de présenter des désordres.

Ses performances, nettement supérieures à celles des projecteurs gammagraphiques usuels, autorisent :

- la détection de fils ou torons rompus ;
- le repérage de défauts d'injection ;
- le repérage précis des aciers passifs et des câbles et par là-même la possibilité de positionner des fenêtres de contrôle ;
- la possibilité en radioscopie d'observer en temps réel et en relief l'intérieur des parois de béton auscultées.

L'emploi de cet appareil a joué un rôle essentiel dans l'amélioration des techniques de dépistage des défauts d'injection et dans le choix de certaines options prises par le guide méthodologique pour la surveillance des « Viaducs à travées indépendantes à poutres en béton précontraint » (VIPP).

MOTS CLÉS : 53 - 61 - Contrôle - Non destructif - Pont - Historique - Rayon X - Caractéristiques - Câble - Fil - Béton précontraint - Appareil de mesure - Défaut (tech.) - Injection (mater.) - Détection - Rupture - Acier.

Introduction

La corrosion des armatures est un phénomène redouté pour les structures en béton armé et plus encore pour celles en béton précontraint.

En béton précontraint, la protection des câbles est assurée par injection d'un coulis de ciment dans les conduits, sitôt les câbles tendus ; la durabilité dépend donc de la qualité de l'injection.

La volonté de détecter les désordres dus à de mauvaises injections a très vite amené le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Blois (CETE Normandie-Centre) à développer, avec l'aide du Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC), l'usage de plusieurs techniques d'imagerie à base de rayonnement gamma :

– depuis 1968, la gammagraphie, mettant en œuvre des sources radioactives (cobalt 60 et iridium 192) et des enregistrements sur films sensibles ;

– de 1971 à 1977, la radiographie à l'aide d'un accélérateur circulaire bétatron soviétique PMB6 [1] et toujours de films ;

– enfin, de 1985 à 1995, SCORPION (fig. 1), système porté par une passerelle de visite d'ouvrages d'art, comportant un accélérateur linéaire et permettant, en plus de l'enregistrement d'images sur films (radiographie), l'enregistrement en temps réel d'images vidéo (radioscopie). L'accélérateur comme le système d'enregistrement ont été développés spécialement pour cette application.

Le concept

L'idée d'origine revient à V. Zouboff. Le croquis de la figure 2, extrait de son rapport de 1973 [2], montre l'ensemble des possibilités d'emploi alors espérées.

À cette époque, comme aujourd'hui d'ailleurs, les sources radioactives de gammagraphie ne permettaient pas d'ausculter des parois de béton d'épaisseur supérieure à 60 cm environ.



Fig. 1 - SCORPION sur le premier pont-caisson ausculté de façon opérationnelle en 1985.

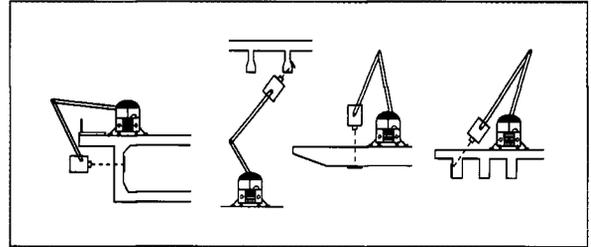


Fig. 2 - Géométries d'utilisation de la radioscopie envisagées en 1973.

QUELQUES DÉFINITIONS

RAYONNEMENT GAMMA :

Rayonnement électromagnétique émis par une source radioactive (changement d'état d'un isotope instable) et caractérisé par deux paramètres principaux :

- ① l'énergie du rayonnement, dont l'unité est le MeV (méga-électron-volt), qui caractérise le pouvoir de pénétration du rayonnement dans la matière,
- ② le débit de dose, dont dépendent pratiquement surtout les temps d'exposition et dont l'unité est le Gy (Gray).

RAYONNEMENT X :

Rayonnement de même nature que le rayonnement gamma, mais en général produit par un appareil électrique : générateur de rayons X, accélérateur de particules, etc.

...-GRAPHIE :

Suffixe indiquant que l'on réalise des images à l'aide d'un film radiographique (comme en photographie classique). On distingue la gammagraphie utilisant une source radioactive et la radiographie dans le cas d'un générateur de rayons X.

...-SCOPIE :

Suffixe utilisé pour la réalisation d'images vidéo, c'est-à-dire à l'aide d'une caméra filmant en temps réel l'image créée sur un écran convertisseur de rayonnement gamma (ou X) en rayonnement lumineux (gammascopie et radioscopie).

N.B. : Ces termes, et les méthodes utilisées, sont les mêmes que ceux utilisés dans le domaine médical, la différence principale étant l'énergie des rayonnements mis en œuvre : un à plusieurs MeV pour les méthodes industrielles et quelques centièmes de MeV pour le médical.

Seul le bétatron soviétique, acheté par le LRPC de Blois en 1971, permettait l'examen de dalles pouvant atteindre 1 m d'épaisseur, mais avec des temps de pose de 15 heures.

Il s'agissait donc d'utiliser un mini-accélérateur linéaire de particules, c'est-à-dire un générateur de rayons X de forte énergie et fort débit par comparaison avec les moyens alors disponibles. Ses performances permettraient d'obtenir des images de bonne qualité à travers des épaisseurs d'un mètre de béton mais en seulement une vingtaine de minutes, ce qui rendrait la méthode tout à fait opérationnelle.

Pour cela, il fallait disposer d'un accélérateur linéaire miniaturisé et concevoir un engin permettant sa manipulation pour le mettre en position de mesure sur divers types d'ouvrages.

Historique

Les différentes étapes marquant l'évolution depuis les premières applications aux ouvrages d'art de la gammagraphie en 1968 jusqu'à la dernière utilisation de SCORPION en 1995 peuvent se résumer de la façon suivante :

- **1970.** Deux ans après avoir lancé les études sur la technique de gammagraphie appliquée aux ponts, V. Zouboff étudie les possibilités d'emploi d'un accélérateur circulaire miniaturisé soviétique, le bétatron PMB 6 [1], qui autorisait des radiographies à travers 80 cm de béton en 8 h de temps de pose.
- **1971.** Achat par le LRPC de Blois du PMB 6, qui est utilisé sur une trentaine d'ouvrages de 1971 à 1977.
- **1973.** V. Zouboff matérialise son idée d'utiliser un accélérateur linéaire en rédigeant une synthèse des essais réalisés avec plusieurs modèles non miniaturisés pesant environ 1 t pour plus de 1 m³ d'encombrement [2].
- **1975-1977.** J.-C. Dufay étudie sur financement de recherche, développe et fait breveter (août 1980) un écran fluorométrique spécialement adapté à la gamme d'énergie des sources de cobalt 60 (1,35 MeV), permettant la réalisation d'images vidéo pour des épaisseurs de béton allant jusqu'à 40 cm (gammascopie) [3], [4].
- **1978.** J.-C. Dufay réactualise les idées de V. Zouboff dans une étude sur les possibilités offertes par l'utilisation d'un accélérateur linéaire [5]. Il commence en même temps, avec le CECP de Rouen, la réalisation du prototype SCORPION I, bras articulé permettant la manipulation d'une source de cobalt pour la radioscopie de ponts-caisson.

- **1982.** Présentation officielle au Directeur des routes du prototype SCORPION I sur un ouvrage [6], [7].
- **1982.** Suite à cette démonstration de la faisabilité de la radioscopie, et après des négociations avec la société CGR-MeV montrant la possibilité de réduire la tête d'émission de l'accélérateur industriel Orion à un poids et des dimensions le rendant manipulable sur ouvrages, le comité « Conseil à l'innovation routière », présidé par J. Bonitzer décide de commander cet accélérateur, ainsi qu'un tracteur et une remorque routière.
- **1983-1984.** Construction de SCORPION II, constitué de l'accélérateur linéaire monté sur une passerelle. Le CECP de Rouen est chargé de la construction de la passerelle de manipulation, montée sur la remorque, ainsi que de l'adaptation du système de déplacement du détecteur déjà développé en 1981 pour SCORPION I et l'auscultation des ponts caisson (fig. 3).
- **1984-1986.** Expérimentations du système, adaptations mécaniques, électroniques, hydrauliques et essais de réception sous la responsabilité de R. Guinez [8], [9], [10].
- **1986.** Présentation officielle du système en fonctionnement sur le pont d'Oléron et à l'occasion de diverses conférences internationales [11], [12].
- **1985-1988.** De nombreux contacts sont pris par J.-P. Chevrier, adjoint au chef du service Physique du LCPC et aboutissent à la signature d'un contrat CETE/LCPC/sociétés autoroutières françaises et italiennes pour l'auscultation des ponts de ces dernières par SCORPION après des adaptations mécaniques rendant possible la radioscopie des âmes de ponts à poutres.
- **1989-1995.** 107,5 semaines d'utilisation sur 78 ouvrages sous la responsabilité de R. Guinez [13], [14].

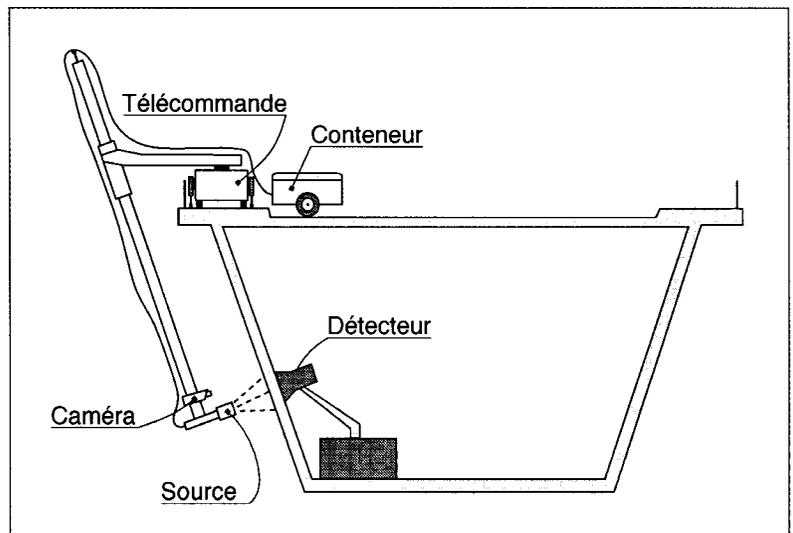


Fig. 3 - Schéma de principe du système SCORPION I.

Principes

Principe d'obtention d'images

Schématisé par la figure 4, un exemple de radiogramme est donné en figure 15. Le principe d'obtention d'images consiste à enregistrer sur un support l'atténuation sélective d'un rayonnement gamma ou X à travers le matériau béton et les objets et hétérogénéités qu'il peut contenir. On obtient ainsi une projection de ces objets.

Principe de SCORPION

SCORPION, système de radioSCOpie par Rayonnement Pour l'Inspection des Ouvrages en bétoN, a été initialement développé pour l'obtention d'images vidéo en temps réel, la radioscopie. En outre, dès le début, il a également permis l'obtention de radiogrammes, comme en gamma-

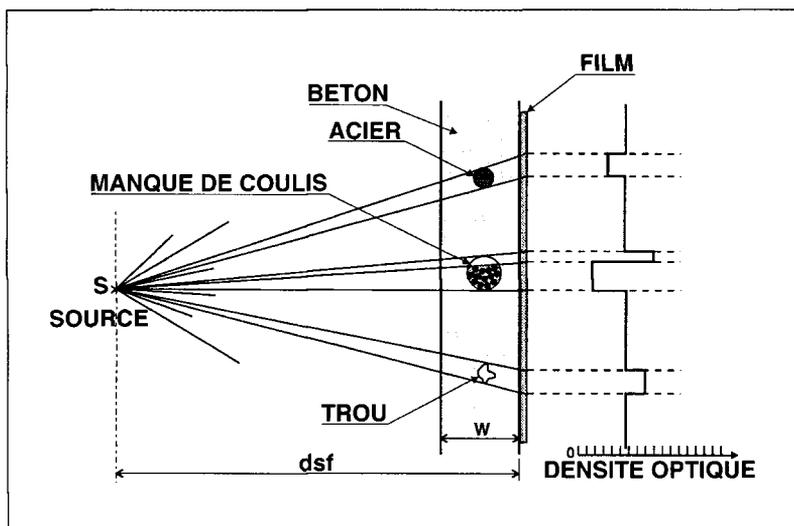


Fig. 4 - Principe d'obtention d'une image.

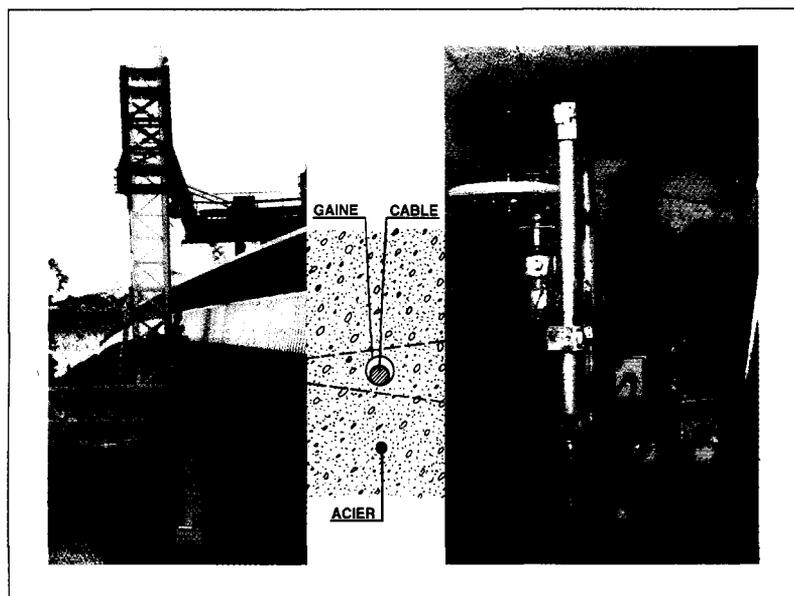


Fig. 5 - Principe de la radioscopie de l'âme d'un voussoir de pont-caisson. Le détecteur est déplacé à l'intérieur du caisson. L'accélérateur est porté à l'extérieur par une passerelle de visite d'ouvrages.

graphie classique mais avec des temps de pose beaucoup plus courts et des limites d'emploi en épaisseurs de béton traversé beaucoup plus larges. Sur ce principe, trois versions du système adaptées à trois types d'ouvrages ont été réalisées : une version radioscopie pour les ponts-caissons, une version radioscopie pour les âmes de poutres de « Viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes » (VIPP) et une version radiographie pour les éléments de structure inaccessibles à la radioscopie.

Version radioscopie des ponts-caisson

La géométrie de ce système est schématisée sur la figure 5.

Télécommandé depuis le camion de commande et d'observation, le détecteur se déplace horizontalement et verticalement sur un système de rails à l'intérieur du caisson. Il convertit en image visible le rayonnement X transmis à travers la paroi du voussoir et généré par l'accélérateur linéaire, lui aussi déplacé par télécommandes à l'extérieur du pont. L'image, de très faible niveau de lumière, est reprise par un système d'amplification de lumière et transmise en temps réel, sous forme de signal vidéo, sur un moniteur placé dans le camion de commande.

Les figures 6 et 7 montrent les caractéristiques géométriques transversales du système et un exemple de résultats sur voussoirs par comparaison à ceux d'une campagne de radiographie gamma. La longueur de câbles contrôlée par semaine, de 150 à 450 m suivant le type de câblage et les conditions d'accès, est nettement supérieure à la longueur cumulée des 40 à 50 radiogrammes que l'on peut obtenir dans le même temps par radiographie gamma, soit un maximum de 15 m. Les résultats donnent donc une image plus complète de l'état des injections de l'ouvrage.

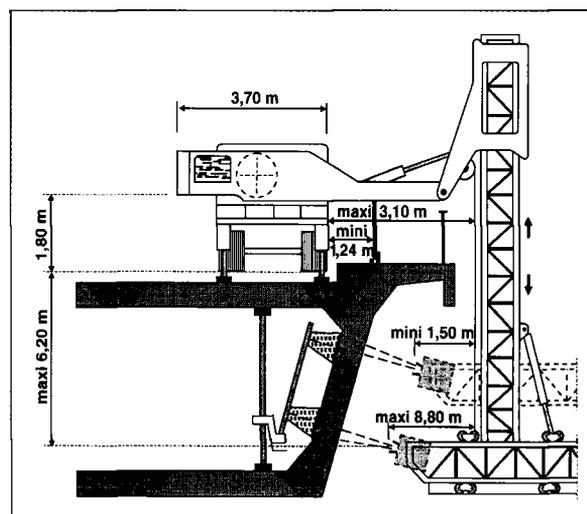


Fig. 6 - Caractéristiques géométriques de la version radioscopie ponts-caisson.

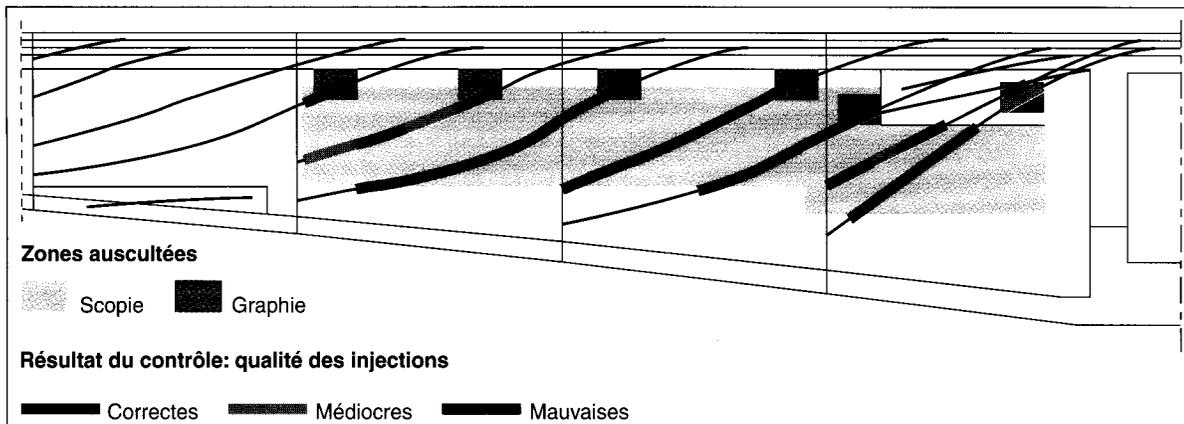


Fig. 7 - Comparaison des zones auscultées par radioscopie et radiographie.

Accélérateur et détecteur prenant en « sandwich » une âme de poutre centrale ou de rive.
 Noter le tirant d'air minimal (4 m) dépendant de la hauteur du mât du détecteur
 et l'intervalle minimal nécessaire entre deux poutres pour le passage de l'accélérateur (90 cm).



Fig. 8.



Fig. 9.



Fig. 10.

Version radioscopie des âmes de poutres de « Viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes » (VIPP)

Cette version, développée à partir de 1989, a permis le contrôle par dépistage systématique de la qualité des injections d'un grand nombre de ces ouvrages. En effet, des défauts d'injections peuvent entraîner des risques de corrosion des câbles. La radioscopie, complétée par la radiographie, permet d'aider à déterminer les zones d'implantation des fenêtres pour évaluer l'état réel de ces câbles.

Dans cette configuration l'accélérateur et le détecteur sont tous les deux solidaires longitudi-

nalement de la colonne de la passerelle mais peuvent être déplacés séparément selon l'axe vertical (fig. 8 , 9 et 10).

L'accélérateur peut de plus être incliné dans le plan transversal à l'ouvrage, ce qui est intéressant pour dissocier les projections de câbles situés dans le même plan horizontal (fig. 11).

La figure 12 montre les résultats obtenus sur une âme de poutre et permet notamment de présenter la zone auscultable pour une position de l'appareil sur l'ouvrage. Elle commence à environ 1,5 m de l'about de la poutre et s'étend sur une longueur de 7 m. Cette longueur est réduite dans le cas des ponts biais.



Fig. 11 - Disposition du détecteur (à gauche) et de l'accélérateur (à droite) pour réaliser des tirs obliques et séparer deux câbles situés dans le même plan horizontal.

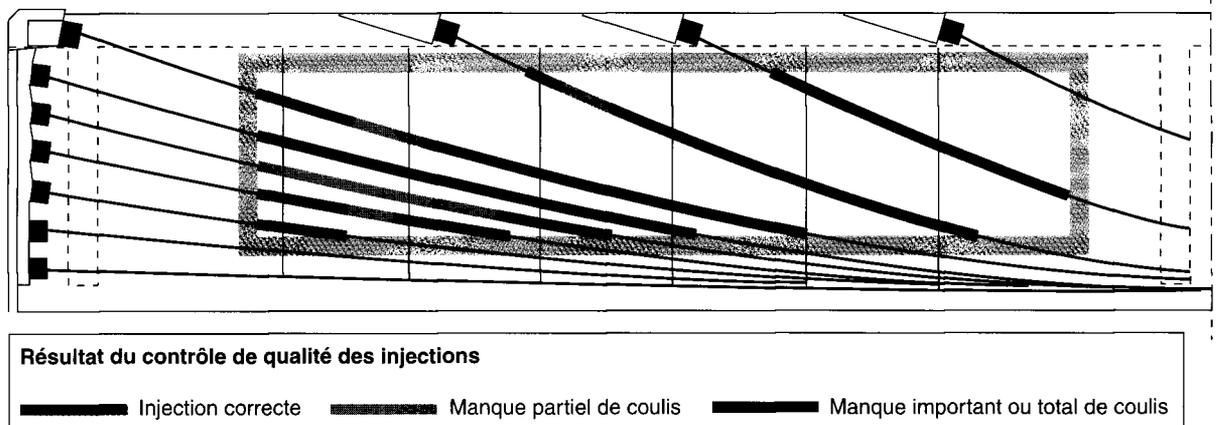


Fig. 12 - Présentation schématique des résultats obtenus sur une extrémité de poutre de VIPP. La qualité de l'injection est classée en trois catégories : correcte, manque partiel de coulis et manque total de coulis.

Versión radiographie

Il suffit de remplacer le système de détection vidéo par des cassettes contenant les films. Le système permet ainsi un grand nombre de positions de tir, comme le montre la figure 13. On peut aussi bénéficier de la puissance de l'accélérateur qui autorise l'auscultation d'épaisseurs de béton importantes ou des temps de pose extrêmement brefs.

Caractéristiques techniques principales

Accélérateur

- Masse de la tête : 240 kg.
- Dimensions de la tête : 80 × 75 × 75 cm.
- Énergie : 4 MeV.
- Intensité du rayonnement à 1 m : réglable de 0,5 à 4 Gy × min⁻¹.
- Diamètre du champ à 2 m : 1 m.
- Intensité du rayonnement de fuite à 1 m : 0,01 Gy pour 4 Gy.

Passerelle

La passerelle est portée par un semi-remorque de 38 t et peut être déployée perpendiculairement à l'axe longitudinal du pont, sans possibilité de rattraper les biais. Calée horizontalement, la remorque autorise le déplacement de la passerelle sur une distance de 7 m permettant ainsi l'auscultation de l'ouvrage sur une longueur équivalente.

Elle permet de franchir des obstacles de 3,5 m de largeur (trottoir, glissières, parapet, etc.) dans le cas des ponts-caisson et seulement 1,75 m pour des ponts à poutres (fig. 16 et fig. 17). Cette limite a souvent été le point critique majeur pour l'utilisation de SCORPION, après ceux dus à la radioprotection ou à la gêne au trafic. En effet, l'encombrement du véhicule est de 5,70 m, sans compter le débordement au déploiement (fig. 14).

Détecteur

Le détecteur est composé de deux parties principales.

- ❶ **Le convertisseur**, qui transforme le rayonnement X en rayonnement visible et fournit ainsi une image en temps réel. Il a été conçu spéciale-

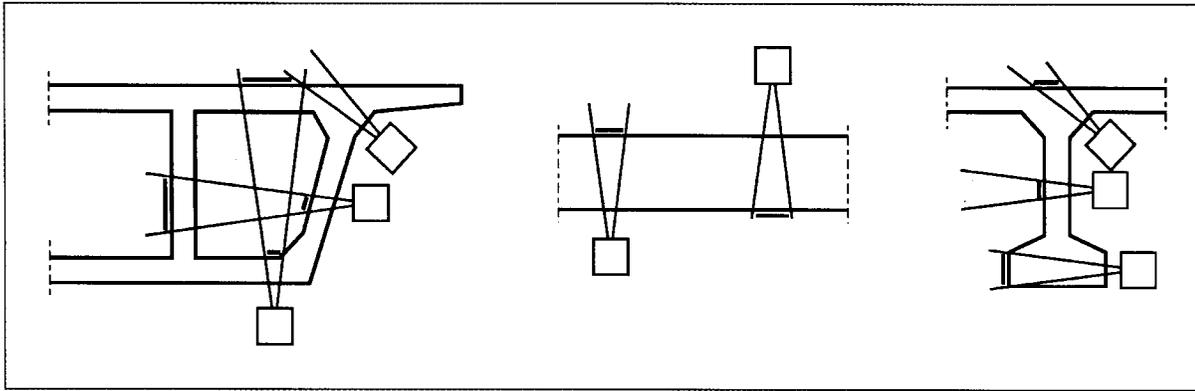


Fig. 13 - Positions possibles d'auscultations en radiographie, utilisées sur au moins l'un des différents chantiers.

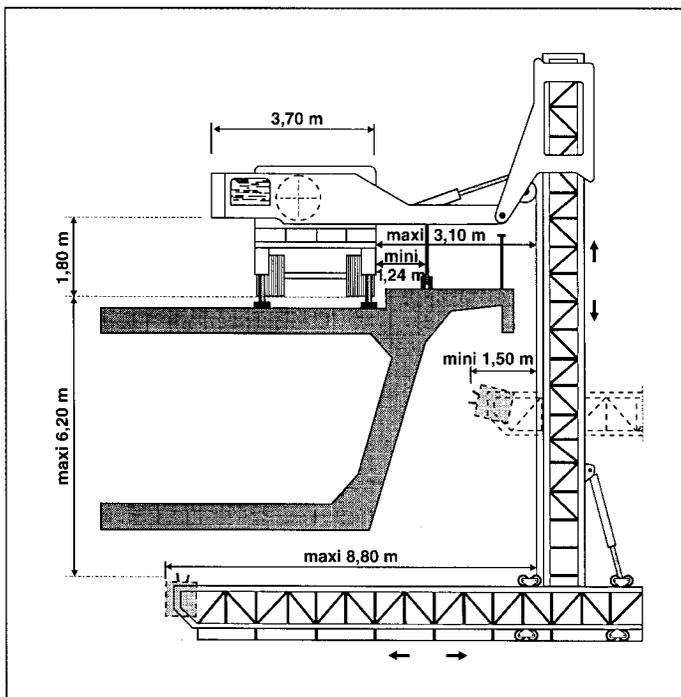


Fig. 14 - Caractéristiques géométriques de la passerelle pour l'auscultation des ponts-caisson.

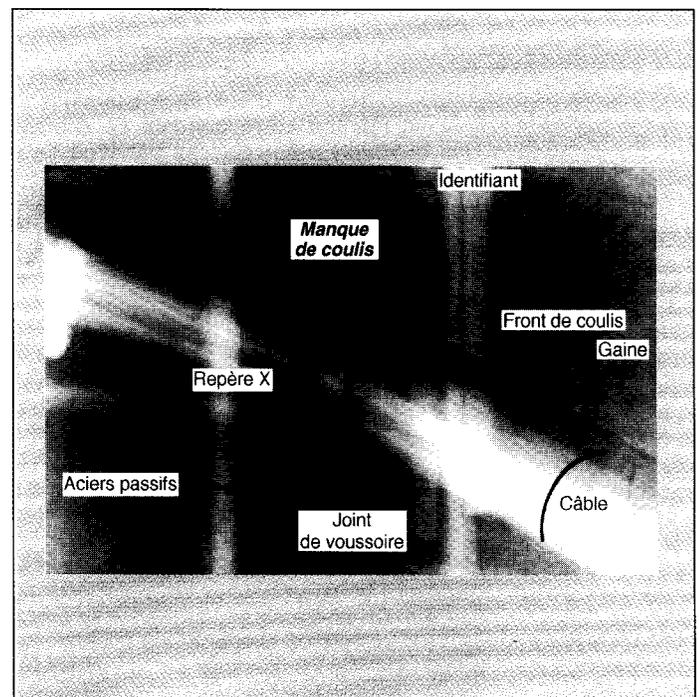


Fig. 15 - Exemple de radiogramme d'un câble de précontrainte présentant un défaut d'injection.

ment pour cette application et présente la caractéristique de posséder un bon rendement pour le rayonnement de très haute énergie utilisé pour la radioscopie du béton.

② **Un système d'amplification de lumière et une caméra de grande sensibilité.** Elle permet de reprendre l'image et de la transmettre sur un moniteur vidéo classique placé dans le camion laboratoire. Cette image peut donc être examinée en temps réel par l'opérateur mais aussi enregistrée, et certains clichés intéressants reproduits sur papier.

Bilan d'utilisation

Résultats techniques

Les tableaux I et II indiquent le nombre d'ouvrages auscultés entre 1985 et 1995 et le nombre de semaines de travail correspondantes, classés

soit par type de client (tableau I), soit par type de contrôle (tableau II).

Il ressort clairement de ces tableaux qu'une seule famille d'ouvrages a été suffisamment étudiée pour permettre d'obtenir des enseignements généraux sur son comportement. Il s'agit des ponts à poutres de type VIPP (Viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes).

Deux générations d'ouvrages de ce type ont été rencontrées.

① **Les ponts construits avant 1973.** Ponts contrôlés pour l'État et pour les départements, qui présentent généralement de 8 à 12 câbles par poutre dont la moitié sont ancrés dans la table de compression (câbles relevés). Pour ces ouvrages, les câbles étaient le plus souvent constitués de fils parallèles de 5 à 8 mm de diamètre.

Parmi ceux-ci, on peut noter les ponts de très longue portée, construits entre 1957 et 1965, dont un seul exemple a été rencontré en Italie. Ils

TABLEAU I
**Nombre d'ouvrages examinés
 et nombre correspondant de semaines,
 les ouvrages étant classés par type de client
 (période 1985/1995)**

Type de clients	Nombre d'ouvrages	Nombre de semaines
Autoroutiers français	34	43,5
Autoroutiers étrangers	11	15
État	25	28
Départements	6	13
S.N.C.F.	1	6
Privé	1	2
Total	78	107,5

TABLEAU II
**Nombre d'ouvrages examinés
 et nombre correspondant de semaines,
 les ouvrages étant classés par type de contrôle
 (période 1985/1995)**

Type de contrôles	Nombre d'ouvrages	Nombre de semaines
Scopie ponts à poutres	55	64
Scopie ponts caisson	3	9
Scopie ponts à nervures	3	4
Graphie ponts à poutres	4	5
Graphie ponts caisson	9	23
Graphie ponts à nervures	2	1,5
Graphie ponts dalle	2	1
Total	78	107,5

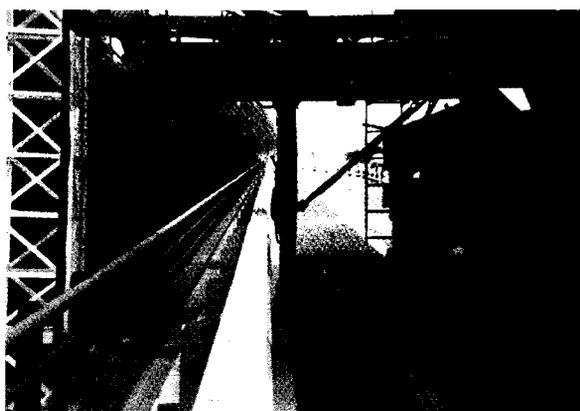


Fig. 16 - Franchissement d'obstacles tels que trottoirs, glissières et parapets.

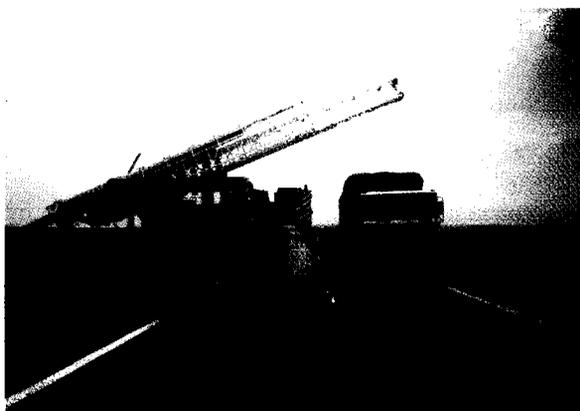


Fig. 17 - Encombrement de la remorque sur la chaussée.

contiennent jusqu'à 24 câbles, généralement sous forme de nappes de deux câbles situés dans le même plan horizontal et ancrés en about.

② **Les ponts construits après 1973.** Ponts contrôlés pour les sociétés d'autoroute et bureaux d'études autoroutiers français et italiens. Ils contiennent très peu de câbles, plongeant très rapidement dans le talon et donc visibles sur une faible longueur compte tenu de la zone auscultable. Ces ouvrages n'ont parfois aucun câble relevé. Les câbles sont constitués de torons.

De l'examen de la précontrainte longitudinale de ces 55 ponts de type VIPP auscultés par radioscopie et de celle des 10 ponts supplémentaires auscultés par radiographie gamma de 1994 à 1995 dans le cadre du dépistage financé par la Direction des routes, on peut déduire que :

- un tiers des VIPP ne montre aucun défaut significatif d'injection (fig. 18) ;

- un tiers des VIPP montre des défauts isolés, tels que des mauvaises injections de coulis de ciment protégeant mal les câbles, mais de trop faibles dimensions pour permettre une réinjection (fig. 19). Pour ces ouvrages, dans l'état actuel de la technique, on ne peut que conseiller de toujours veiller à empêcher les venues d'eau, c'est-à-dire à avoir une bonne chape d'étanchéité, de bons joints de dilatation également étanches et des gargouilles écartant les eaux de ruissellement des âmes, abouts et talons des poutres ;

- le dernier tiers des VIPP montre des manques suffisamment importants de coulis pour conseiller l'ouverture de fenêtres ou des investigations complémentaires (fig. 20). Dans un cas sur cinq (6 % des ouvrages), les manques étaient tels qu'il a été conseillé d'envisager une campagne de réinjection après vérification de la non-corrosion des torons.

Ces résultats, fournis par la radioscopie, réalisée sur des longueurs de câbles représentatives et confirmés par l'ouverture de fenêtres, ont amené la Direction des routes à continuer la campagne de dépistage par radiographie gamma sur tous les VIPP concernés et non auscultables par radioscopie du fait de contraintes soit géométriques, soit de radioprotection, soit de gêne au trafic.

Bilan financier

Si l'on ne considère que les frais de fonctionnement, de contrats de maintenance, de réparations, d'entretien et d'adaptation des matériels et des méthodes, de personnel et de frais généraux, le coût d'exploitation de SCORPION de 1985 à 1995 s'élève à environ 11 MF en francs de 1995 pour 107,5 semaines d'utilisation, soit 102 kF par semaine. Cette somme a été prise en charge par les gestionnaires des ouvrages examinés.

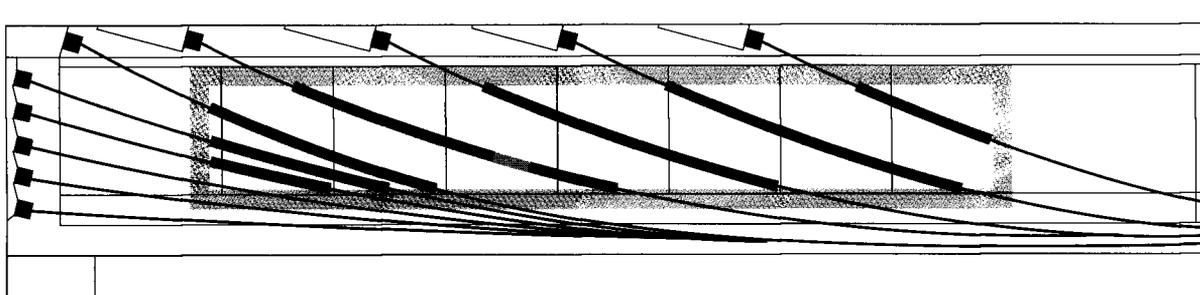
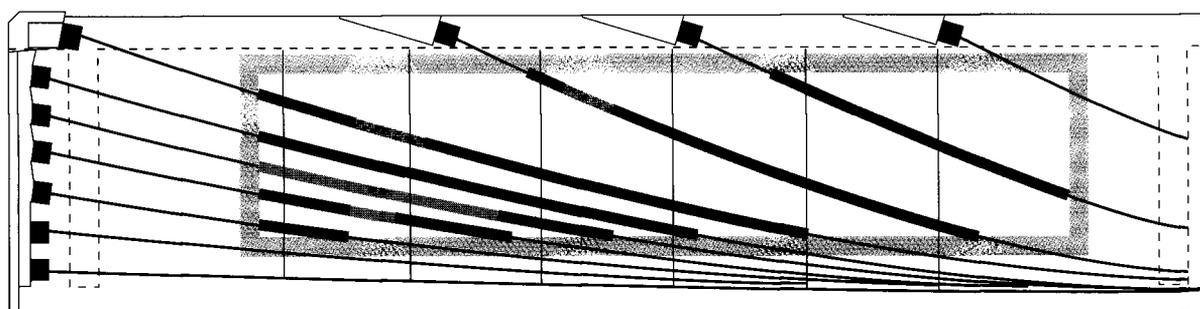


Fig. 18 - Exemple de poutre correctement injectée.



Résultat du contrôle de qualité des injections

Injection correcte
 Manque partiel de coulis
 Manque important ou total de coulis

Fig. 19 - Exemple de poutre présentant des manques localisés de coulis d'injection.

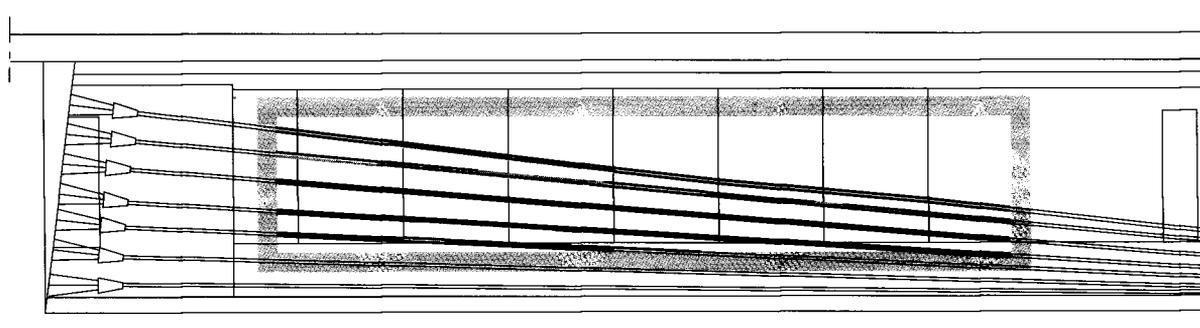


Fig. 20 - Exemple de poutre présentant des manques très importants de coulis d'injection, certains câbles n'ayant même pas été injectés.

Cependant, dans un bilan commercial complet il faut aussi tenir compte des investissements antérieurs à l'utilisation opérationnelle : recherche, achat de l'accélérateur, achat des camions, frais de construction de la passerelle et du système vidéo ainsi que d'un hangar. Cet ensemble, qui représente environ 16 MF, a été financé entre 1980 et 1985 directement par la Direction des routes (Comité « Conseil à l'innovation routière ») et par le LCPC.

Limites d'utilisation du prototype

Le système SCORPION a permis de mieux connaître l'état de santé d'un certain nombre d'ouvrages du parc français. Mais il ne faut pas

oublier son rôle en tant que prototype, c'est-à-dire pour aider à définir ce que pourrait être un appareil opérationnel.

Grâce à l'expérience acquise, une grande partie de ces contraintes pourraient être facilement surmontées à l'occasion de la réalisation d'une nouvelle version de matériel de radioscopie.

Contraintes géométriques

Les caractéristiques géométriques précédemment évoquées, en particulier l'encombrement transversal de 5,70 m, la lenteur de mise en place du fait de la nécessité de caler l'appareil à l'horizontale avec limitations lorsque les pentes sont trop fortes, l'impossibilité de franchir plus de 1,35 m

de glissières/trottoir/parapet en conditions normales d'utilisation (voir fig. 16), ont fait que de nombreux ouvrages n'ont pu être auscultés.

La gêne à la gestion du trafic

La lenteur d'installation obligeait à laisser le système jour et nuit sur le pont et cela avec un encombrement minimum de 5,70 m, alors que les bandes d'arrêt d'urgence sont souvent très réduites sur le tablier. Les gestionnaires étaient en outre obligés de couper si possible tout le sens de circulation (autoroutes à deux fois deux voies comme sur la figure 21), ou sinon deux voies sur trois (autoroutes à deux fois trois voies). Sur les routes nationales les ponts à poutres sont encore nombreux où la largeur de la chaussée est réduite à 7, voire même 6 m. Dans ce cas, il n'est généralement pas possible d'intervenir, car il est très difficilement envisageable de couper une route nationale.

La radioprotection

L'utilisation d'un accélérateur présente un certain nombre d'avantages sur l'utilisation de sources radioactives : notamment, il n'est émetteur de rayonnement que lorsqu'il est sous tension. En outre l'angle d'ouverture de l'émission est faible.

Cependant il existe un danger venant principalement des rayonnements rétrodiffusés et des rayonnements de fuite à l'arrière de l'accélérateur avec la version ponts caisson, ou du rayonnement direct avec la version ponts poutres.

La zone dangereuse est dans tous les cas un demi-cercle extérieur à l'ouvrage de rayon variable entre 125 et 500 m suivant la configuration et l'épaisseur totale de béton traversé.

Il s'ensuit que beaucoup de ponts situés en ville ou même à la campagne avec quelques habitations proches n'ont pas pu être contrôlés avec ce système (fig. 22).

En outre, les réglementations concernant la radioprotection ne sont pas encore tout à fait les mêmes



Fig. 21 - Neutralisation d'un sens de circulation pendant l'auscultation d'un ouvrage autoroutier.



Fig. 22 - Exemple d'un ouvrage non contrôlable en raison de la présence d'habitations.

pour tous les pays et surtout les interprétations qui sont faites par les autorités pour l'utilisation d'un accélérateur sur chantier peuvent entraîner des contraintes supplémentaires importantes.

Ces difficultés dues à la radioprotection sont certainement les plus difficiles à réduire. Pour cela il faut pouvoir diminuer la valeur des débits de dose mis en œuvre, ce qui passe par une efficacité notablement accrue du système de détection.

Le coût des prestations

Si SCORPION a réalisé 107,5 semaines de mesures sur 78 ouvrages en 6 ans, c'est aussi suite à une campagne prolongée d'information.

En dépit de cela, si l'on enlève les semaines réalisées au titre de la recherche et des mises au point ainsi que celles réalisées sur financement de la Direction des routes pour un dépistage systématique, le nombre d'ouvrages inspectés à la demande des départements est très faible.

Par ailleurs, un ouvrage ausculté une fois n'ayant pas de raison *a priori* d'évoluer au point de nécessiter une nouvelle intervention dans un délai bref, il s'ensuit que le marché s'épuise rapidement.

Le minimum d'utilisation pour compenser les frais fixes étant de 8 semaines de chantier annuel, le parc d'ouvrages français n'est pas suffisant pour assurer un marché rentable.

C'est donc à une autre échelle, par exemple européenne, qu'un tel outil devrait être développé commercialement.

Conclusions

L'utilisation de la gammagraphie depuis 1968 dans le réseau des laboratoires des ponts et chaussées présente un bilan très positif.

Les contrôles qui ont été faits lors de la construction ont joué un rôle essentiel dans l'amélioration de la qualité des injections des gaines de câbles de précontrainte depuis 1970.

Avec l'augmentation des performances permise par SCORPION et l'utilisation de la radioscopie c'est une méthode non destructive qui n'a pas pour l'instant de concurrent pour plusieurs applications :

- la détection de fils rompus,
- le repérage des défauts d'injection,
- l'aide au positionnement des fenêtres de contrôle grâce à la détermination des zones risquant d'être corrodées,
- la possibilité d'observer en temps réel et la possibilité d'avoir une vision en relief grâce aux déplacements séparés de l'émetteur et du détecteur.

SCORPION a permis de confirmer les craintes que l'on pouvait avoir sur la qualité des injections telles qu'elles ont été pratiquées notamment dans les années 1950 et 1960, voire même au début des années 1970.

Le fait qu'un tiers des ouvrages soit mal injecté et non protégé contre une corrosion des câbles en cas de venue d'eau est à prendre très au sérieux. Toutes les précautions doivent être prises pour que ces venues d'eau soient empêchées : par exemple, grâce à une bonne chape d'étanchéité, de bons joints de dilatation et de bonnes évacuations d'eau.

Même si le LRPC de Blois n'a jamais observé de fils ou torons très corrodés et encore moins rompus dans les fenêtres qui ont été ouvertes, il n'en demeure pas moins que de telles observations ont été faites en France par d'autres laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées au cours des deux dernières décennies. Ces constatations à l'occasion de visites ou inspections détaillées

ont souvent été faites trop tard pour permettre de sauver l'ouvrage mais heureusement toujours assez tôt pour éviter des conséquences graves.

Le guide méthodologique à paraître pour la surveillance des VIPP prendra en compte cette donnée en demandant un diagnostic systématique par gammagraphie des plus anciens d'entre eux. En effet un enseignement important de la campagne de 10 ans de radioscopie a été de montrer que la méthodologie de gammagraphie, malgré sa plus faible représentativité, apporte les mêmes conclusions sur l'état de protection des câbles d'un ouvrage. Le guide indique l'échantillonnage minimum du contrôle par sondages avec les positions optimales des films pour l'obtention d'un résultat significatif.

Pour finir, précisons que les technologies évoluent sans cesse. En particulier, il existe aujourd'hui des amplificateurs de brillance demandant quatre fois moins de débit de dose de rayonnement et limitant ainsi les problèmes de radioprotection. Aussi est-il possible qu'un nouveau SCORPION soit construit, à l'échelle européenne cette fois.

Néanmoins il faudra sans doute attendre qu'un vieillissement du parc des ouvrages européens rende le marché attractif.

Cependant, le coût de l'appareil et de son utilisation doit être comparé aux économies faites en détectant à temps les ouvrages malades, en les traitant et en évitant ainsi leur remplacement prématuré.

SCORPION fait partie de ces outils qui ne pourraient être mis à la disposition des gestionnaires que dans le cadre d'une politique de financement public.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ZOUBOFF V. (1970), *Étude d'un béatron PMB 6, accélérateur circulaire miniaturisé de fabrication soviétique de 6 MeV, permettant des radiographies à travers 80 cm de béton mais à raison de 8 heures de pose pour 1 film*, Rapport du LRPC de Blois.
- [2] ZOUBOFF V. (1973), *Étude des possibilités d'emploi d'un accélérateur linéaire pour la radiographie des ouvrages d'art*, Rapport du LRPC de Blois.
- [3] DUFAY J.-C. (1977), *Radioscopie télévisée pour le contrôle non destructif des ouvrages d'art en béton précontraint*, Rapport du LRPC de Blois.
- [4] DUFAY J.-C. (1978), Une nouvelle possibilité d'examen des ouvrages d'art : la radioscopie, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **98**, novembre-décembre, pp. 85-94.
- [5] DUFAY J.-C. (1978), *Étude de la rentabilité d'un accélérateur linéaire pour la radiographie des ouvrages d'art*, Rapport du LRPC de Blois.
- [6] CHAMPION M., DUFAY J.-C. (1982), Naissance du SCORPION : Système de radioscopie télévisée par rayonnement pour l'inspection des ouvrages en béton, *Revue générale des Routes et des Aéroports*, **589**, septembre, pp. 7-9.
- [7] DUFAY J.-C. (1985), SCORPION : premier système de radioscopie télévisée haute énergie pour le contrôle non destructif des ouvrages d'art en béton précontraint, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **139**, septembre-octobre, pp. 77-83.
- [8] GUINEZ R. (1984), *Contrôle des ouvrages d'art en béton par radiographie télévisée*, Französische-Deutsche Informationstage, 28-29 November in Saarbrücken Saarlandhalle.
- [9] GUINEZ R. (1985), *Expérimentation de l'accélérateur linéaire et de la radioscopie*, Rapport du LRPC de Blois.
- [10] GUINEZ R. (1986), *Comparaison des résultats obtenus sur un même ouvrage à l'aide de 21 clichés gammagraphiques et à l'aide de 172 mètres d'auscultation des gaines par radioscopie*, Rapport du LRPC de Blois.

- [11] GUINEZ R. (1986), *SCORPION II, un outil moderne et puissant utilisant la radiographie et la radioscopie par rayonnement X pour l'inspection des ouvrages en béton armé et précontraint*, 2nd International Conference on « on line » surveillance and monitoring, Venice, Fondation Cini, 12-14 mai, pp. 375-383.
- [12] GUINEZ R. (1987), *Radioscopie télévisée pour le contrôle non destructif des ouvrages d'art en béton précontraint*, 3^e Convegno Nazionale Qualita e Diagnostica, Bologna, 21-22 octobre.
- [13] GUINEZ R., CHATELAIN J., CHEVRIER J.-P. (1989), *Radioscopie des ouvrages en béton pré-*
- contraint*, Symposium international AIPC, Lisbonne, 7-9 septembre, pp. 347-352.
- [14] GUINEZ R. (1991), Contrôle non destructif des ouvrages d'art par gammagraphie, radiographie, et radioscopie, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **171**, janvier-février, pp. 83-93.
- [15] GUINEZ R. (1993), Contrôle non destructif des ouvrages d'art par gammagraphie, radiographie, et radioscopie, *Revue pratique de contrôle industriel*, **179 bis**, mars, pp. 62-70.

ABSTRACT

SCORPION. A review after ten years of use

R. GUINEZ

SCORPION is a radiation fluoroscopy system for the inspection of concrete engineering structures which was developed between 1973 and 1984.

The system has been operational since 1985 and has been used to inspect a large number of engineering structures deemed likely to exhibit disorders.

Its performance is considerably superior to that of conventional gamma graphic sources and can

- detect broken wires or cable strands ;
- identify defective injection ;
- precisely locate passive steel and cables and permit the positioning of observation holes ;
- allow real time fluoroscopic observation in three dimensions of the interior of the inspected concrete walls.

This apparatus has played an important role in improving the detection of injection defects and in the selection of solutions described in the methodological guide for monitoring viaducts with statically determinate spans constructed from prestressed concrete beams.