

Utilisation d'un accélérateur de particules pour la radiographie des ouvrages du génie civil en béton précontraint

Léa Monange¹, David Busson¹, Florent Plassard¹

¹ Cerema, Lyon, France

RESUME

Cet article présente le retour d'expérience du projet Scorpion mené entre les années 1970 et 1995 par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois. Ce projet a permis la radiographie de dizaines d'ouvrages d'art en béton précontraint.

Le projet Scorpion a été arrêté au profit de la gammagraphie en 1995. Aujourd'hui, la dernière équipe de gammagraphie en France, présente au Cerema de Bron, étudie une méthode alternative à la gammagraphie, basée sur un accélérateur de particules, dans le but de remplacer les sources scellées. A la suite du retour d'expérience seront présentées les avancées des études actuellement conduites pour l'utilisation d'un accélérateur de particules pour la radiographie d'ouvrages d'art en béton précontraint.

Mots-clés radiographie, accélérateur de particules, contrôle non destructif, ouvrage d'art

Key-words radiography, particle accelerator, non-destructive inspection, civil engineering structure

I. INTRODUCTION

La radiographie (ou gammagraphie) des ouvrages en béton précontraint permet de détecter les vides d'injection au sein des gaines de précontraintes [Aubagnac et al., 2002], [Breysse et al., 2005]. Ces vides peuvent conduire à la présence de corrosion dans les gaines de précontrainte, ce qui pourrait, à terme, entraîner une rupture fragile des unités de précontrainte et nuire à la pérennité de l'ouvrage. La détection de tels désordres permet de décider de la nécessité de réaliser des réparations avant que l'intégrité de l'ouvrage ne soit compromise [Lau et al., 2023].

C'est en 1968 que la première équipe de gammagraphie est constituée au laboratoire de Blois. Les sources scellées utilisées sont des sources de Cobalt 60 et d'Iridium 192. 4 ans plus tard, en 1972, le laboratoire de Lyon s'équipe d'un gammagraphe contenant une source de Cobalt 60 afin de répondre à des besoins croissants de gammagraphie.

En 1970, le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Blois cherche à améliorer sa technique de radiographie en achetant un accélérateur circulaire de particules afin d'investiguer des épaisseurs de béton plus importantes [Monange et al., 2022]

II. UTILISATION D'UN ACCELERATEUR DE PARTICULES AU LRPC DE BLOIS

A. Utilisation d'un accélérateur circulaire de particules

Le Bétatron est composé d'un émetteur cylindrique, d'un bloc d'alimentation et d'un pupitre de commande (voir Figure 1).

Après l'acquisition du Bétatron par le laboratoire de Blois, des tests ont été entrepris afin de comparer les résultats obtenus grâce à l'utilisation de l'accélérateur de particules et ceux obtenus grâce à l'utilisation de la source de Cobalt 60.

Les résultats de ces investigations montrent que :

- L'accélérateur de particules permet d'investiguer 90 cm de béton en 6h et 105 cm en 11h
- Les images obtenues grâce au Bétatron sont de meilleure qualité que celles obtenues grâce au Cobalt 60 pour les épaisseurs de béton supérieures à 50 cm



FIGURE 1. Vue d'ensemble du Bétatron (bloc d'alimentation à gauche, émetteur au centre et pupitre de commande à droite)

Le Bétatron a ensuite été utilisé en chantier entre 1974 et 1977. Se pose ensuite la question d'un changement de technologie au profit d'un accélérateur linéaire de particules du fait du faible débit de dose du Bétatron qui engendre des temps d'exposition longs.

B. Mise au point de la chaîne d'acquisition (radioscopie)

La radioscopie consiste à faire des vidéos des gaines de précontrainte. L'équipe de Blois a développé et fait breveter un système de détection pour cette méthode entre 1974 et 1977. Ce système est présenté sur la Figure 2.

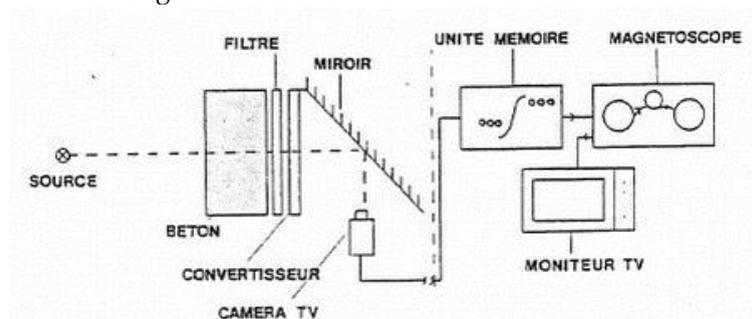


FIGURE 2. Schéma de fonctionnement de la chaîne d'acquisition pour la radioscopie

Les rayons X ou gamma qui passent à travers le béton sont transformés par un convertisseur en lumière visible. Cette lumière visible est analysée par la caméra à bas niveau de lumière. L'image est ensuite envoyée en direct à un écran de télévision dans le véhicule laboratoire.

C. Le projet Scorpion I

Afin de prouver la faisabilité de la radioscopie sur les ouvrages d'art avec la chaîne d'acquisition présentée ci-dessus, un premier prototype a été fabriqué. Il met en œuvre uniquement une source de rayonnement gamma. Grâce à ce procédé, il a été possible de faire la radioscopie d'ouvrages en béton précontraint d'épaisseur maximale de 45 cm. Le schéma de principe de fonctionnement de ce prototype est présenté sur la Figure 3.

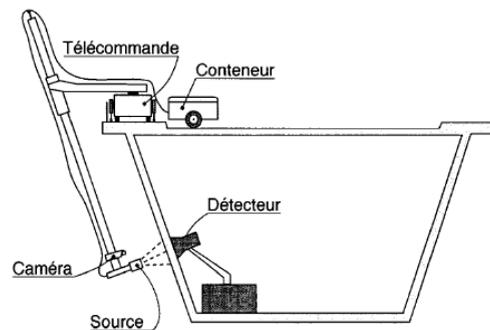


FIGURE 3. Principe de fonctionnement de Scorpion I

D. Le projet Scorpion II

Après les essais concluants réalisés grâce au prototype Scorpion I avec une source scellée de Cobalt 60, les équipes ont jugé qu'il était nécessaire de s'équiper d'un matériel possédant une énergie plus importante car les épaisseurs de béton pouvant être investiguées étaient limitées. Afin de déterminer l'appareil le plus adapté à leur projet, des études comparatives des accélérateurs de particules existants ont été rédigées.

1. Etudes comparatives des accélérateurs de particules existants

Une première étude a été menée en 1973, elle a ensuite été actualisée en 1978.

Le but de ces études était de comparer les modèles d'accélérateurs de particules existants sur le marché à l'époque et pouvant convenir pour réaliser des radiographies sur ouvrage d'art. L'étude de 1978 a mis en avant un appareil en particulier : le Neptune 10. Il permettait la radiographie d'une épaisseur de béton de 1.30m à 1.40m en 30 minutes ainsi que la radioscopie d'une épaisseur de béton d'un mètre.

Les caractéristiques de cet appareil sont les suivantes :

- Poids : 1.2 T
- Energie : 10 MeV
- Débit de dose : 8 Gy/min

Cette étude a aussi permis de montrer que de tels appareils pouvaient être déplacés sans être endommagés, ce qui n'était pas évident à l'époque.

En parallèle, le Centre d'Etudes et de Construction de Prototypes (CECP) de Rouen commence une réflexion sur le manipulateur. Le manipulateur est un système mécanique destiné à mettre en

œuvre le matériel sous les ouvrages, au contact de la structure investiguée. Des questions vont rapidement se poser quant au poids et à l'encombrement du matériel à porter par ce manipulateur. La conclusion de cette étude est donc que deux pistes doivent être étudiées pour la suite de ce projet :

- Utilisation du Neptune 10 pour remplacer le Cobalt 60
- Utilisation d'une version miniaturisée d'un accélérateur de particules pour remplacer le Cobalt 60 (appareil inexistant sur le marché, étude d'un développement possible)

2. Commande du matériel utilisé pour la suite du projet Scorpion II

Aucune des deux solutions proposées par l'étude présentée ci-dessus n'a finalement été choisie. L'accélérateur de particules miniature n'a pas été développé, la société estimant qu'il n'y avait pas assez de débouchés commerciaux pour un tel appareil. Le projet s'est orienté vers un autre appareil : le Neptune 4. Il est composé d'une tête d'irradiation, d'une baie technique et d'un boîtier de commande. Chacun de ces éléments est présenté sur la Figure 4. Cet accélérateur de particules a une énergie de 4 MeV et un débit de dose de 4 Gy/min. Il permet de radiographier une épaisseur de béton de 120 cm en 30 min et la radioscopie d'ouvrages dont l'épaisseur est inférieure à 80 cm.



FIGURE 4. Différents éléments du Neptune 4: baie technique (à gauche), tête d'irradiation (au centre) et boîtier de commande (à droite)

En 1981, l'Etat prend la décision d'acheter cet accélérateur de particules ainsi qu'un support manipulateur pour le mettre en œuvre sous les ouvrages. Ce support a été conçu et fabriqué par le CECP de Rouen. Il a mobilisé l'équipe du CECP pendant plusieurs mois et a nécessité 3 ans de travail entre 1982 et 1984. Il prend la forme d'une passerelle négative sur camion et l'intégralité du matériel y sera fixé à demeure (voir la Figure 5). C'est un prototype unique entièrement dédié à l'activité de radiographie des ouvrages d'art.



FIGURE 5. Support manipulateur en place sur un ouvrage

3. Réception du matériel et tests

Le système complet (support manipulateur et accélérateur de particules) a été livré à Blois le 29 août 1984.

Une période d'essais et de mise au point, d'une durée totale de 20 mois, a permis d'apporter des modifications au système. A l'issue de cette période le prototype a été considéré comme fonctionnel en chantier.

4. Contraintes d'utilisation du système

Ce matériel ne pouvait pas investiguer tous les types d'ouvrages. En effet, il n'était pas adapté aux ponts à poutres (l'accélérateur ne pouvait pas être placé entre deux poutres d'un pont à poutres, voir au paragraphe suivant), aux ouvrages présentant une pente longitudinale de plus de 6%, ou encore aux ouvrages avec un biais de plus de 40°. L'utilisation de Scorpion II impliquait une gêne au trafic importante en raison de la neutralisation de deux voies de circulation par le support manipulateur en position déployée. Ce support devait rester à demeure sur l'ouvrage pendant toute la durée du chantier du fait de temps d'installation longs (1/2 journée). Un chantier de radiographie ou de radioscopie nécessitait la présence de 5 personnes.

5. Adaptation du matériel pour l'utilisation sur les ponts à poutres

Tout comme pour les tests de faisabilité de la radioscopie, l'utilisation du matériel sur les ponts à poutres a été testée grâce à une source scellée de Cobalt 60 dans un premier temps. Pour ce faire, le CECP a réalisé des pantographes afin de placer la source en regard du détecteur sur les poutres (voir Figure 6).



FIGURE 6. Installation des pantographes sur une poutre

La faisabilité de la procédure a de nouveau été démontrée grâce à l'utilisation de Cobalt 60 entre 1986 et 1987, mais des difficultés ont tout de même été rencontrées. La mise en œuvre du matériel était longue et difficile par exemple. De plus, cette solution n'était pas envisageable sur le long terme, puisque comme avec Scorpion I, l'énergie du Cobalt 60 n'est pas suffisante pour pouvoir faire de la radioscopie, but recherché à l'époque. Le CECP a donc commencé l'étude d'une nouvelle

solution permettant l'utilisation de l'accélérateur de particules. Le support manipulateur a donc été modifié en ce sens au cours de l'année 1987 (voir Figure 7).



FIGURE 7. Modification de l'installation de la tête d'irradiation sur le support manipulateur : première version à gauche (mouvement de rotation uniquement) et nouvelle version à droite (déplacement vertical et mouvement de rotation)

Malheureusement, cette modification permettait uniquement l'auscultation des 3 premières poutres puisque la portée maximale de la passerelle négative était de 8m.

L'équipe a donc étudié la possibilité de fabriquer un nouveau prototype présentant plus d'opportunités pour l'auscultation des ponts à poutres. Pour ce faire, ils ont tenté de rédiger un contrat avec des sociétés autoroutières européennes afin de financer le nouveau prototype. Une étude de marché européenne a été réalisée en 1992 afin de s'assurer de la pertinence de ce nouvel investissement. Les conclusions de cette étude ont montré des pistes prometteuses, mais les partenaires ont finalement décidé de ne pas s'investir dans le financement du nouveau support manipulateur. Il a donc été décidé de continuer à utiliser le matériel existant.

E. Bilan et fin du projet Scorpion

Le matériel Scorpion II a été utilisé entre 1985 et 1995. Il a permis l'auscultation de 78 ouvrages, ce qui représente 107.5 semaines de chantier.

A l'issue de ces 10 années, le matériel utilisé devenait vieillissant sans être adapté à l'auscultation des ponts à poutres. La maintenance de l'accélérateur et de la chaîne d'acquisition devenait difficile, certaines pièces n'étant plus remplaçables. La comparaison des différentes méthodes a montré que la gammagraphie était une solution moins coûteuse. Pour ces raisons, la décision de mettre fin à l'utilisation de l'accélérateur de particules a été prise au profit du maintien des deux équipes de gammagraphie à Lyon et à Blois.

Aujourd'hui, les conditions de transport et de stockage des sources scellées sont plus exigeantes et plus difficiles à mettre en œuvre en chantier. Ceci nous conduit à actualiser les connaissances sur l'utilisation d'un accélérateur de particules.

III. ACTUALISATION DU PROJET SCORPION 20 ANS PLUS TARD : PROJET ALTERNATIVE A LA GAMMAGRAPHIE

A. Etude comparative

Tout comme ce qui avait été fait à l'époque, une étude comparative des caractéristiques techniques a été réalisée afin de recenser les accélérateurs de particules existants ou innovants pouvant être mis en œuvre au contact des ouvrages d'art et correspondant au besoin d'un point de vue énergétique [Stein et al., 2004]. Nous avons de ce fait exclu de cette étude les appareils trop lourds et ayant une énergie supérieure à 7.5 MeV pour des raisons de radioprotection. Le but de cette étude est de pouvoir faciliter le choix définitif d'une technologie adaptée aux besoins du Génie Civil.

B. Modélisation automatique des accélérateurs de particules

Avec l'assistance du CEA en 2022, nous avons construit une méthode de calcul permettant de déterminer les temps de pose dans un cas particulier connu pour les accélérateurs de particules recensés dans l'étude. Ce cas d'étude est défini par l'épaisseur de béton à traverser, la nature du détecteur utilisé, les réglementations en termes de radioprotection et les caractéristiques techniques de l'accélérateur de particules considéré.

Nous cherchons ici à traverser une épaisseur de béton de 1.2m en moins d'une heure et une épaisseur de béton de 1.5m sur une journée de travail (8h, temps d'installation et de désinstallation compris).

Cette étude présente tout de même quelques limites :

- Nous avons considéré un détecteur couramment utilisé pour la gammagraphie. L'utilisation d'un autre détecteur pourrait permettre d'optimiser les temps de pose par exemple.
- Nous comparons les accélérateurs de particules pour un cas d'étude donné mais nous n'avons aucune information sur la qualité de l'image obtenue. Afin d'obtenir ces informations, il est nécessaire de faire des tests sur un site d'essai connu et dédié.
- Il reste des paramètres opérationnels qui n'ont pas été pris en compte dans notre étude : temps d'installation du matériel, temps de chauffe et/ou de refroidissement de la machine, ...)

Malgré les limites soulignées ci-dessus, cette étude nous a permis d'affiner notre cahier des charges. Cela a aussi permis de déterminer les 3 principaux axes de travail à venir :

- Etude des détecteurs existants et choix de la solution la plus appropriée
- Conception d'un support manipulateur ergonomique adapté aux ouvrages d'art
- Développement d'une plateforme de tests

C. Etude d'opportunité quant au support manipulateur

Après avoir finalisé notre travail avec le CEA, nous avons conduit une étude d'opportunité afin de comparer les différents types de support manipulateur permettant de mettre l'accélérateur de particules au contact de la structure.

Nous avons identifié 3 cas d'étude différents :

- Un support léger : ce support est embarqué sur un moyen d'accès standard. Le support léger est la solution privilégiée car c'est celle qui permettrait le plus de liberté quant au type d'ouvrage à investiguer et c'est aussi la moins coûteuse (achat et entretien). L'inconvénient de cette solution est de dépendre des moyens d'accès qu'il est possible de louer. La contrainte la plus importante correspond au poids que l'on peut embarquer sur la plateforme. C'est cette donnée qui va conditionner la faisabilité de la solution. La majorité des passerelles présentes sur le parc locatif français permettent d'embarquer entre 300 et 400 kg. Ce poids doit comprendre le poids du matériel, sans oublier de prendre en compte le poids des travailleurs qui vont mettre en place ce dernier.
- Un support intermédiaire : ce support porte l'intégralité du matériel à mettre en œuvre sur les ouvrages. Le matériel est fixé à demeure sur le support qui permet son acheminement et son positionnement précis. Ce support automatisé n'a pas vocation à embarquer du personnel. Il pourra en plus nécessiter la présence d'un moyen d'accès standard sur chantier afin de s'assurer de la bonne installation du matériel.
- Un support lourd : ce type de support correspond au support utilisé pour le projet Scorpion. Tout comme pour le support intermédiaire, l'intégralité du matériel y est fixée à demeure. En revanche, ce support permet également l'accès du personnel au contact de la structure à investiguer.

IV. BILAN ET CONCLUSION

Le retour d'expérience du projet Scorpion est fondamental pour la réussite du projet actuel. Il permet tout d'abord de montrer sa faisabilité, mais il permet aussi d'éviter les erreurs connues par le passé.

Ce projet n'est pas encore terminé à l'heure d'aujourd'hui. Il est prévu de disposer d'un matériel opérationnel à l'horizon 2025. Nous travaillons actuellement sur l'étude des détecteurs disponibles sur le marché et sur une campagne de tests d'un accélérateur de particules. Le choix final de la technologie ionisante est en cours. Il est utile de reprendre l'étude des supports initiée en 2022 afin de dimensionner le support manipulateur dans le détail.

REFERENCES

Aubagnac, C., Dérobert, X., Abraham, O. (2002). Evaluation de différentes méthodes d'auscultation non destructives avant autopsie d'un élément de poutre du Pont Neuf de Foix.

Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 241, 85-97. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00027-0)

Breysse, D., Abraham, O. (2005). Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton. *Presses des Ponts, Paris*.

Lau, K., Permeh, S., Lasa, I. (2023). Corrosion of prestress and posttension reinforced concrete bridges. Woodhead Publishing. *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821840-2.00013-4>

Monange, L., Busson, D., Plassard, F. (2022). Retour d'expérience Scorpion. *Document interne confidentiel*.

Stein, M., Kasyanov, V., Chakhlov, V., Macleod, J., Marjoribanks, P., Hubbard, S. (2004). Small-Size Betatron for Radiographic Inspection. *16th World Conference on NDT, Montréal, Canada*. <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=2440>