

diagnostic, maintenance, réparation

PRÉSERVATION DES OUVRAGES D'ART EN BÉTON PRÉCONTRAINTE : APPLICATION DE L'ÉMISSION ACOUSTIQUE À LA DÉTECTION DE LA CORROSION

Marianne PERRIN*, **, Laurent GAILLET*, Christian TESSIER*, Hassane IDRISI**

*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Route de Bouaye BP4129, 44341 Bouguenais Cedex

**Laboratoire MATEIS/RI₂S-CNRS UMR-5510 INSA Lyon, Bâtiment Léonard de Vinci,
21 avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex

1. INTRODUCTION

L'objectif principal des gestionnaires d'ouvrages est de garantir la fiabilité de leurs structures. Dans cette optique, la mise en place d'une maintenance efficace nécessite le développement et l'application de méthodes de contrôle innovantes. Il est évident que la détection précoce des pathologies peut permettre de réduire le coût et la difficulté des actions correctives à mettre en place. Outre la gêne aux usagers provoquée par l'immobilisation des infrastructures, son impact environnemental est également non négligeable.

Une des familles d'ouvrages d'art couramment employée lorsque les franchissements deviennent importants est les ouvrages d'art en béton précontraint. Cette technique de construction a été imaginée et brevetée par Eugène Freyssinet en 1928. Son principe est de mettre en compression le béton afin qu'il résiste mieux aux efforts de

traction imposés par le trafic routier à la structure. Dans le cas de la précontrainte intérieure par post-tension, des armatures de précontrainte sont insérées dans des gaines pré installées dans les parois de l'ouvrage. De part et d'autre des éléments en béton, des systèmes d'ancrage permettent de maintenir les câbles en tension et de transférer des efforts de compression au béton. Un coulis de ciment est également injecté à l'intérieur des gaines afin de protéger les armatures.

Malheureusement ces armatures peuvent être sujettes à une forme particulière de corrosion : la corrosion sous contrainte. La présence d'espèces ioniques agressives comme les ions chlorures ou les ions sulfates dans le liquide interstitiel engendre des phénomènes de corrosion localisée. Le développement de ces réactions crée des cellules occlusées où la présence d'oxygène est limitée et où les réactions d'hydrolyse produisent de l'hydrogène. L'absorption de l'hydrogène au sein de la matrice métal-

lique a pour conséquence sa fragilisation (Nürnberg, 2002 ; Schroeder *et al.*, 2003). De plus, ces attaques de corrosion localisée provoquent une concentration de contraintes importante accélérant la rupture de l'armature. Les dispositions constructives de ce type d'ouvrage limitent l'emploi des méthodes de contrôle non destructives (CND). En effet les zones d'auscultation sont limitées aux systèmes d'ancrage. Aujourd'hui peu de techniques permettent de suivre à distance et en temps réel l'évolution de telles structures. Une méthode CND pouvant répondre à ces impératifs est l'émission acoustique (EA). Par l'intermédiaire de capteurs, les émissions acoustiques provoquées par des défauts actifs se propageant dans la structure peuvent être recueillies puis caractérisées par des paramètres de forme et/ou des paramètres fréquentiels. De nombreuses études ont montré la capacité de l'EA à détecter la corrosion (Ramadan *et al.*, 2008 ; Jomdecha *et al.*, 2007). Il s'agit également d'une technique utilisée sur ouvrages pour détecter notamment les ruptures d'armatures (Zejli, 2007).

Cet article présente la démarche utilisée et les résultats obtenus dans le cadre de la détection de la fragilisation par l'hydrogène, un des mécanismes présent lors de la corrosion sous contrainte assistée par l'hydrogène des armatures de précontrainte. Les mécanismes de fragilisation par l'hydrogène ont été recrées par un essai accéléré au thiocyanate d'ammonium. Une première série de tests sur des bâts d'essais a permis de détecter plusieurs phases d'endommagement distinctes pouvant être caractérisées par différents paramètres issus de l'analyse des salves d'EA. L'application de cette méthode à de plus grands corps d'épreuve a fait l'objet d'une seconde série d'essais. L'optimisation du choix du type de capteur et de sa position est une étape primordiale à une auscultation efficace. La configuration de l'essai a permis de comparer l'activité acoustique en fonction du milieu dans lequel l'armature est placée. Les résultats montrent certaines difficultés de détectabilité de l'activité acoustique dans des milieux enrobés de coulis de ciment. Néanmoins l'emplacement judicieux de certains capteurs sur le corps d'épreuve apporte des résultats encourageants.

2. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

2.1. Matériau et milieu

Les armatures de précontrainte utilisées sont constituées d'acier faiblement allié. Elles sont composées d'un fil central droit entouré par six fils hélicoïdaux (Figure 1). Les fils d'acier sont obtenus par tréfilage à froid ce qui leur confère une microstructure particulière. Elle est composée majoritairement de grains de perlite orientés dans le sens de tréfilage et qui offrent au matériau des caractéristiques mécaniques importantes (Tableau 1).

Le milieu corrosif choisi est composé de 250 g.L^{-1} de thiocyanate d'ammonium (NH_4SCN). Il est utilisé lors d'essais normalisés afin de caractériser le comportement des arma-

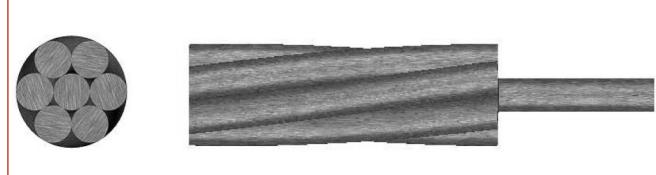


Figure 1. Armature de précontrainte.

Composition Chimique (éléments principaux)				
C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
0,8	0,25	0,5	0,02	0,02
Propriétés mécaniques				
$F_{0,1}$ [kN]	F_m [kN]	Alongement [%]	Section [mm^2]	Pas [mm]
274	295	5,3	151,2	240

Tableau 1. Composition chimique et propriétés mécaniques de l'acier de précontrainte.

tures de précontrainte vis-à-vis de la fragilisation par l'hydrogène. La source d'hydrogène provient du groupement NH_4^+ . Le rôle du thiocyanate (SCN^-) est de favoriser l'absorption de l'hydrogène par l'acier en empêchant sa recombinaison en gaz dihydrogène. La solution corrosive est maintenue à une température moyenne de $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

2.2. Essais sur bâts statiques

Le câble est maintenu tendu par un système de coincement conique (clavetage). Le câble est tendu à 75 % de sa force de rupture garantie. La cellule de corrosion étanche est placée sur le câble et remplie de thiocyanate d'ammonium. Deux capteurs d'EA résonnantes (micro 80) sont collés de part et d'autre de la cellule de corrosion, de manière équidistante (Figure 2). Chaque capteur est relié à un préamplificateur de gain 40 dB, lui-même relié au système d'EA (chaîne PCI2). L'auscultation est stoppée lorsqu'un des fils du câble rompt.

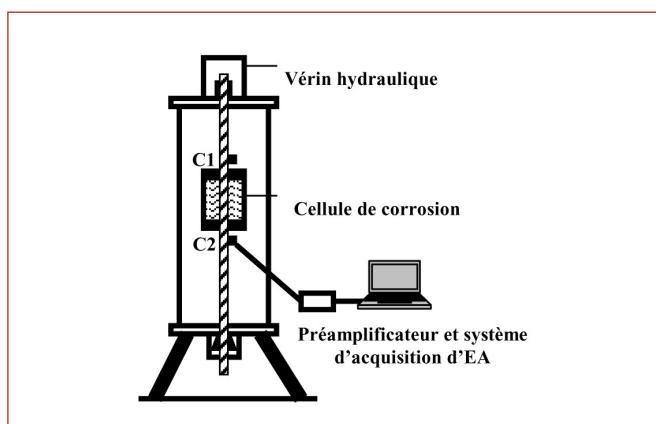


Figure 2. Essais sur bâts statiques.

2.3. Essais sur corps d'épreuve réalistes

Les corps d'épreuve ont été développés afin de simuler les conditions d'utilisation des câbles de précontrainte. Un bâti rigide de 3 mètres permet de maintenir de chaque côté des blocs d'about (Figure 3). Les blocs d'about sont des parallélépipèdes en béton armé, à l'intérieur desquels ont été placés une tromplaqué et une gaine. L'armature est ten-

due à 70 % de sa force de rupture garantie de part et d'autre des blocs d'about et son allongement est maintenu grâce à une tête d'ancrage et à des clavettes. Une gaine en PEHD est mise en place sur la moitié de l'armature. L'ancrage B et la gaine sont injectés avec un coulis de ciment. Une cellule de corrosion est positionnée au milieu de l'armature. Une première étape d'optimisation de l'instrumentation a permis de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser des capteurs basse fréquence (capteurs R6) pour recueillir les EA propagant dans des milieux cimentaires. L'instrumentation des deux ancrages est présentée sur la figure 4. Un capteur micro 80 et un capteur R6 ont également été installés à côté de la cellule de corrosion afin de recueillir des signaux de référence (figure 3). Trois systèmes d'EA ont été utilisés : une chaîne DISP avec 4 voies d'acquisition, une chaîne PCI2 4 voies et une chaîne PCI2 2voies.

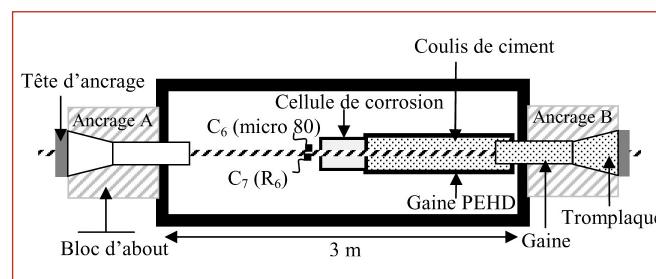


Figure 3. Essais corps d'épreuve réalisistes.

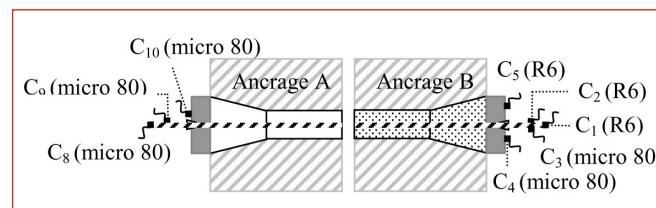


Figure 4. Instrumentation des ancrages.

3. RÉSULTATS

3.1. Résultats obtenus sur bâtis statiques

La rupture d'un des fils de l'armature a été obtenue après 300 heures et a engendré le décollement des capteurs. Par analyse post-mortem, trois ruptures sont décelées. Elles sont positionnées à 137, 139 et 142 mm du capteur 1. La localisation des EA entre les deux capteurs montre un pic énergétique à 136 mm du capteur 1 correspondant à la première rupture de fil (Figure 5). L'erreur de localisation est donc comprise entre 0,7 et 4,5 %. Cette localisation permet également d'analyser uniquement les EA ayant conduit à la rupture du fil. La figure 6 montre les différentes phases d'émission, les signaux de rupture ont été filtrés afin de faciliter l'analyse des mécanismes précurseurs. Trois phases d'activité sont alors isolées. Une première phase d'activité importante jusqu'à 125 heures où l'on détecte la formation et l'évolution des bulles d'hydrogène sur la surface du matériau. Ces mécanismes sont associés à la disso-

lution de la couche pseudo-passive présente sur l'armature (produits de tréfilage) ainsi qu'au début de la pénétration de l'hydrogène dans l'acier. La seconde phase d'endommagement identifiée par EA est relativement peu émissive. Il s'agit d'une phase où la concentration d'hydrogène dans le matériau augmente, entraînant ainsi sa fragilisation et l'amorce de microfissures. La dernière phase beaucoup plus émissive provient de la propagation rapide de fissures à l'intérieur du fil conduisant à sa rupture brutale.

Afin de caractériser ces trois phases, trois paramètres d'EA ont été mis en évidence (Tableau 2). La première phase est identifiée par des amplitudes faibles ainsi que par des durées et des nombres d'alternances de salves faibles. Plusieurs études montrent que les mécanismes de formation et d'évolution des bulles d'hydrogène sont très émissifs (Idrissi *et al.*, 2001) mais moins énergétiques que la propagation de fissures (Yuyama *et al.*, 1983). La deuxième phase d'endommagement est caractérisée par un très faible nombre d'EA. Plusieurs auteurs (Ramadan *et al.*, 2007; Sung *et al.*, 1997) ont montré que les phénomènes d'amorçage et de propagation sub-critique de fissures sont peu émissifs. En ce qui concerne la propagation rapide de fissures, elle a été à plusieurs reprises spécifiée comme étant énergétique et entraînant de fortes amplitudes (Jomdecha *et al.*, 2007; Ramadan *et al.*, 2008; Sung *et al.*, 1997; Yuyama *et al.*, 1983).

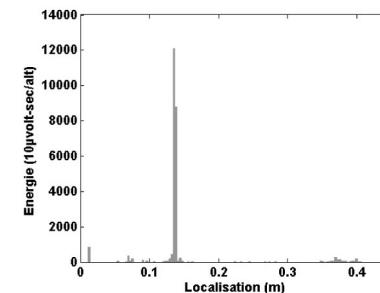


Figure 5. Localisation des EA.

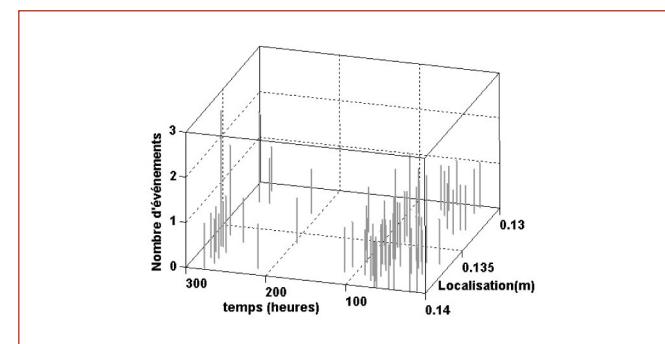


Figure 6. Localisation des EA en fonction du temps.

Paramètres d'EA	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Amplitude	< 40 dB	Faible nombre d'EA	40-100 dB
Durée	< 500 µs		400-25000 µs
Nombre d'alternances	< 60		6-2200

Tableau 2. Paramètres caractéristiques de chaque phase d'endommagement.

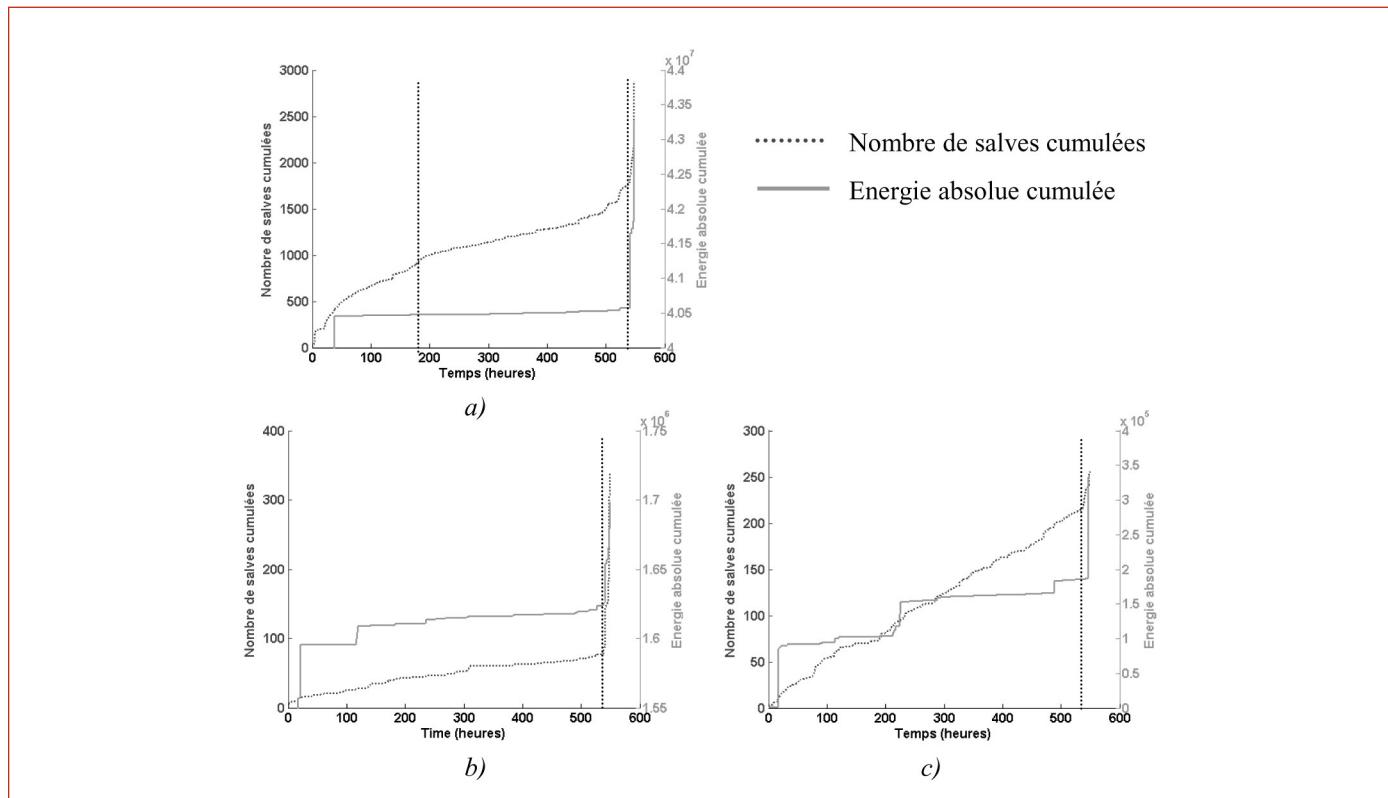


Figure 7. EA recueillies sur corps d'épreuve réalistes : a) capteur 7, b) capteur 10, c) capteur 4.

3.2. Résultats obtenus sur corps d'épreuve réalistes

L'activité acoustique recueillie par les capteurs 6 et 7 est prise comme référence puis comparée à l'activité recueillie sur les ancrages. Les trois phases d'endommagement observées sur structures simplifiées sont également détectées par le capteur 7 (Figure 7a). La phase de propagation de fissures (phase 3) est caractérisée par un net accroissement de l'activité acoustique et par une augmentation de l'énergie.

En ce qui concerne l'auscultation sur la tête d'ancrage A, l'activité acoustique met très clairement en valeur la troisième phase d'endommagement avec une densité importante d'EA et des amplitudes allant jusqu'à 65 dB (Figure 7b). Concernant les EA recueillies sur la tête d'ancrage B, la présence de coulis favorise la propagation des basses fréquences et les capteurs R6 se révèlent plus efficaces que les capteurs micro 80. La plupart des capteurs ont une activité particulière en phase 3 avec une augmentation de la densité d'EA (Figure 7c).

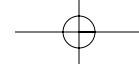
4. CONCLUSION

La technique d'EA se révèle être une méthode efficace pour la détection de la corrosion sous contrainte assistée par l'hydrogène. Sur les structures simplifiées de laboratoire, trois phases du cycle d'endommagement ont pu être caractérisées grâce aux paramètres amplitude, durée et nombre d'alternances des salves d'EA. En revanche, la confrontation de cette technique à des conditions d'utilisa-

tion in-situ montre certaines pertes d'informations liées à l'atténuation et à la distorsion des ondes dans ces structures. Néanmoins, les capteurs placés sur l'ancrage injecté ont montré leur capacité à détecter la phase de propagation de fissures jusqu'à la rupture d'un des fils. De nouveaux essais doivent maintenant être réalisés dans des milieux proches de la solution interstitielle afin de déterminer si cette phase d'endommagement peut être un bon critère d'alarme dans le cadre d'une auscultation in situ. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet national ACTENA. Les auteurs tiennent à remercier l'ANR et EDF pour leur participation financière.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Idrissi H., Limam A., « Characterization of damage growth by acoustic emission measurement in reinforced concrete », *NDT &E international*, vol. 36, 2003, p. 563-569.
- Jomdecha C., Prateepasen A., Kaewtrakulpong P., « Study on source location using acoustic emission system for various corrosion types », *NDT&E international*, vol. 40, 2007, p. 584-593.
- Nürnberg U., « Corrosion induced failures of prestressing steel », *Otto Graf journal*, vol. 13, 2002, p. 9-25.
- Ramadan S., Gaillet L., Tessier C., Idrissi H., « Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique », *Applied surface science*, vol. 254, 2008, p. 2255-2261.



Schroeder RM., Müller IL., « Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement susceptibility of an eutectoid steel employed in prestressed concrete », *Corrosion science*, vol. 45, 2003, p. 1969-1983.

Sung KY., Kim IS., Yoon YK., « Characteristics of acoustic emission during stress corrosion cracking of Inconel 600 alloy », *Scripta materialia*, vol. 37, 1997, p. 1255-1262.

Yuyama S., Kishi T., Hisamatsu Y., « AE analysis during corrosion, stress corrosion cracking and corrosion fatigue processes », *Journal of acoustic emission*, vol. 2, 1983, p. 71-93.

Zejli H., Détection et localisation par émission acoustique de fils rompus dans les ancrages d'ouvrages d'art, Thèse de doctorat, UTC, 2007.

