

**DÉTECTION ET SUIVI PAR ÉMISSION ACOUSTIQUE DE LA  
FRAGILISATION PAR L'HYDROGÈNE LORS DE LA CORROSION  
SOUS CONTRAINTE DES ARMATURES D'OUVRAGE D'ART**  
*DETECTION AND MONITORING BY ACOUSTIC EMISSION OF  
HYDROGEN EMBRITTLEMENT FOR STRESS CORROSION  
CRACKING OF PRESTRESSING TENDONS*

M. PERRIN\* <sup>1,2</sup>, S. RAMADAN <sup>2</sup>, L. GAILLET <sup>1</sup>, C. TESSIER <sup>1</sup>, H. IDRISSE <sup>2</sup>

(1) LCPC, division MACOA, centre de NANTES – route de Bouaye – BP4129 – 44341  
BOUGUENAIS Cedex, France

(2) Laboratoire MATEIS-CNRS UMR-5510 Equipe RI<sub>2</sub>S, INSA-Lyon – Bât. L. de Vinci – 21  
avenue J. Capelle – 69621 VILLEURBANNE Cedex, France

(\*) Tél. 02 40 84 59 51 – Fax. 02 40 84 59 92

E-mail : marianne.perrin@lcpc.fr

## Résumé

La détection de la corrosion des câbles de précontrainte nécessite l'utilisation de techniques non-destructives comme l'émission acoustique (EA) qui permet la surveillance de structures présentant des défauts évolutifs. L'objectif de ce travail est d'adapter l'EA aux exigences structurelles des ouvrages, de détecter et localiser la corrosion sous contrainte (fragilisation par l'hydrogène) des câbles de précontrainte. Des essais de corrosion accélérée au thiocyanate d'ammonium sur des câbles sous tension ont permis le choix du matériel d'EA permettant le recueil d'une réponse acoustique correcte. L'analyse des émissions a ensuite permis de valider la capacité du système d'EA à détecter des signaux issus du phénomène de corrosion sous contrainte. Enfin, la distinction, par EA, des différentes étapes du mécanisme (amorçage, propagation de fissures...) intervenant sur une armature est observée. Cela laisse présager la possibilité de détecter ces différentes phases sur ouvrage et donc d'avoir une méthode permettant de détecter prématurément un endommagement.

## Abstract

*Prestressing strands corrosion detection needs non-destructive techniques like acoustic emission (AE) which allows the monitoring of active defects of structural elements. The aim of this work is to adapt AE to structural requirement of bridges, to detect and localise stress corrosion cracking (induced by hydrogen) of tendons. Accelerated corrosion tests with ammonium thiocyanate on tensioned cables have permitted the AE equipment selection allowing the recording of a correct acoustic response. Then, acoustic emission analyse has permitted to validate AE system capacity to detect signals coming from hydrogen embrittlement phenomenon. Finally, distinction by AE of the different steps of the mechanism (crack initiation, crack propagation...) occurring on prestressing strands is observed. The possibility of detection of these different steps is hopeful to develop a method for earlier damages detection on bridges.*

Auteurs correspondants : H. Idrissi ([hassane.idrissi@lyon.fr](mailto:hassane.idrissi@lyon.fr))

L. Gaillet ([laurent.gaillet@lcpc.fr](mailto:laurent.gaillet@lcpc.fr))

## I. INTRODUCTION

Les méthodes de contrôle non-destructif sont de plus en plus nombreuses et variées. La plupart d'entre elles ne permettent pas le contrôle en temps réel de l'évolution de la structure. A l'inverse de l'émission acoustique. Grâce à la réception, par les capteurs placés sur la structure, d'ondes acoustiques émises par des défauts actifs, une détection et une localisation des défauts peut être réalisée [1-2].

Naturellement, une méthode de contrôle non-destructif doit être adaptée non seulement au type d'endommagement mais aussi à la structure à surveiller.

Les ouvrages d'art étudiés, dans le cadre de ce travail, sont les ponts en béton précontraint. Outre la multiplication du nombre d'ouvrages bénéficiant de cette technologie (48% des ouvrages neufs sont issus de cette technique de construction), cette méthode est également utilisée pour la construction de centrales nucléaires ou encore pour les unités de production d'énergie. Elle est basée sur le principe de mise en compression du béton par des câbles tendus (à 80% de leur force à la rupture) ayant une haute résistance mécanique [3]. Les câbles sont maintenus dans des gaines placées dans les parois en béton des ouvrages en précontrainte intérieure par post-tension. Un coulis de ciment est inséré entre la gaine et le câble en acier afin de le protéger. La mise en tension est réalisée par l'intermédiaire de systèmes d'ancrage de part et d'autre de l'élément béton [4].

Malgré les protections appliquées, les armatures métalliques peuvent subir un endommagement par corrosion, notamment la corrosion sous contrainte [5]. Elle peut être initiée par des défauts de surface du matériau ou encore par les espèces ioniques présentes dans le liquide interstitiel du béton, à proximité des armatures. Au niveau de ces sites d'amorçage, la présence d'un champ de contrainte associée à une concentration notable en hydrogène entraîne la fragilisation de la structure métallique [6]. Lorsque les contraintes en fond d'entaille atteignent une valeur critique, la fissure se propage alors jusqu'à la rupture brutale de l'armature.

L'EA a montré à plusieurs reprises sa capacité à détecter les phénomènes de corrosion [7-14]. De plus, elle est utilisée sur ouvrages d'art pour détecter différents types d'endommagement [15-18] mais aussi dans d'autres secteurs d'activité, notamment sur des structures métalliques subissant la corrosion comme les cuves de stockage.

Ce travail propose de valider dans un premier temps le matériel d'EA à utiliser pour obtenir une bonne réception des salves acoustiques sur un essai accéléré de corrosion. Ensuite les signaux sont analysés de manière à valider la capacité du système à détecter la corrosion sous contrainte (fragilisation par l'hydrogène), le but final étant de pouvoir caractériser les différentes phases d'endommagement en attribuant à chaque mécanisme des paramètres caractéristiques issus de l'analyse.

## II. APPAREILLAGE ET MODE OPERATOIRE

L'étude est menée sur des torons de type T15,7. Il s'agit de câble comprenant un fil central droit et six autres fils entourant de manière hélicoïdale le fil central (figure 1).



Figure 1: Géométrie du toron T15,7 composé d'un fil central et 6 fil hélicoïdaux

L'acier utilisé pour ces câbles est obtenu après tréfilage à froid ce qui lui donne une microstructure particulière. En effet, les grains de perlite fine sont orientés dans le sens long du tréfilage. Cette microstructure procure au câble des caractéristiques mécaniques importantes, notamment en ce qui concerne la contrainte maximale à la rupture puisqu'elle dépasse 1900 MPa (285 kN). L'ensemble des caractéristiques mécaniques de l'acier sont présentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ainsi que sa composition chimique.

Composition chimique de l'acier (wt%)	
C	0,8
Si	0,25
Mn	0,50
P	0,02
S	0,02
Propriétés mécaniques	
F <sub>0,1</sub> (kN)	275
F <sub>m</sub> (kN)	295
Agt (%)	5,3
Section (mm <sup>2</sup> )	150
Pas (mm)	240

Tableau 1 : Composition chimique et propriétés mécaniques de l'acier tréfilé T15,7

Les conditions d'utilisation des câbles sur ouvrage sont alors recrées en laboratoire. La structure utilisée pour appliquer un déplacement constant est présentée sur la figure 2. Elle est composée d'un bâti rigide et d'un vérin hydraulique permettant de tendre le câble à 80% de sa force de rupture garantie soit environ 220 kN. Préalablement à la mise sous tension de l'éprouvette, celle-ci est munie d'une cellule de corrosion. Cette cellule permet de mettre en contact le câble avec une solution corrosive. La solution choisie est du thiocyanate d'ammonium (NH<sub>4</sub>SCN) de concentration égale à 250g.L<sup>-1</sup> (suivant la norme NF EN ISO 1560-3). Le thiocyanate d'ammonium est largement connu pour la validation de la tenue des aciers à la fragilisation par l'hydrogène. Pendant l'essai, la solution est chauffée (50°C) à l'aide de cordons chauffant qui encerclent la cellule de corrosion.

Les capteurs piézoélectriques placés sur l'éprouvette permettent de transformer le signal mécanique créé par l'endommagement en un signal électrique. L'optimisation du choix du type de capteur a été réalisée. Les premiers essais de corrosion sous contrainte (CSC) ont été mis en place. L'auscultation durant tout le cycle d'endommagement du câble par trois types de capteur (résonnant ou large bande) a permis de choisir le capteur présentant le meilleur rapport détectabilité/facilité de mise en place. Le capteur ayant obtenu les meilleurs résultats est le micro 80 (EPA).

Lors du suivi du câble tendu en laboratoire, quatre capteurs sont utilisés (figure 2). Les capteurs 1 et 2 sont placés de part et d'autre de la cellule de corrosion afin d'être à proximité de l'endommagement et ainsi obtenir des signaux de référence. Les capteurs 3 et 4 sont disposés au niveau du système d'ancrage : le capteur 3 est placé sur le pot à clavette et le capteur 4 sur l'extrémité du fil. Le couplage des capteurs avec la structure est réalisé par collage rigide (colle HBMX60).

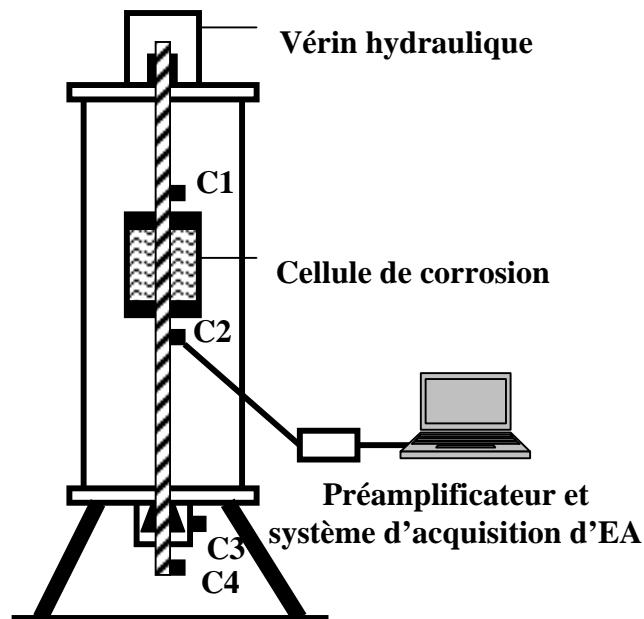


Figure 2: Positionnement des capteurs piézoélectriques

Le signal reçu par les différents capteurs est ensuite amplifié et traité. La fréquence d'échantillonnage utilisée pour l'acquisition des données est de 1 MHz. Le seuil d'acquisition utilisé est de 26 dB.

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

#### III.1 Activité acoustique globale

L'activité acoustique a été enregistrée tout au long de l'essai par les quatre capteurs présents sur la structure (figure 3). Le nombre de salves cumulées reçues par les capteurs 3 et 4 (placés sur le système d'encastrement et sur l'extrémité du toron) est nettement inférieur au nombre de salves reçues par les deux capteurs (capteurs 1 et 2) entourant la cellule de corrosion. On peut aussi constater que l'évolution du nombre de salves cumulées sur les voies 3 et 4 ne présente pas de variations aussi franches que sur les voies 1 et 2. Ceci est une conséquence de l'atténuation des ondes acoustiques parcourant de longues distances ainsi que des pertes de signaux engendrées par les différences d'impédance des milieux traversés.

Quatre zones d'activité distinctes sont discernables pour les voies 1 et 2, bien que le nombre de salves cumulées sur ces deux voies soient différentes (phénomène attribuable à la qualité des couplages capteur-éprouvette). Tout d'abord, l'activité acoustique est faible, puis dans la seconde partie de la courbe, le taux d'accroissement du nombre de salves devient très important. La troisième partie de la courbe est linéaire alors que la dernière période présente un pic d'EA relativement bref qui concerne la rupture d'un des fils de l'armature.

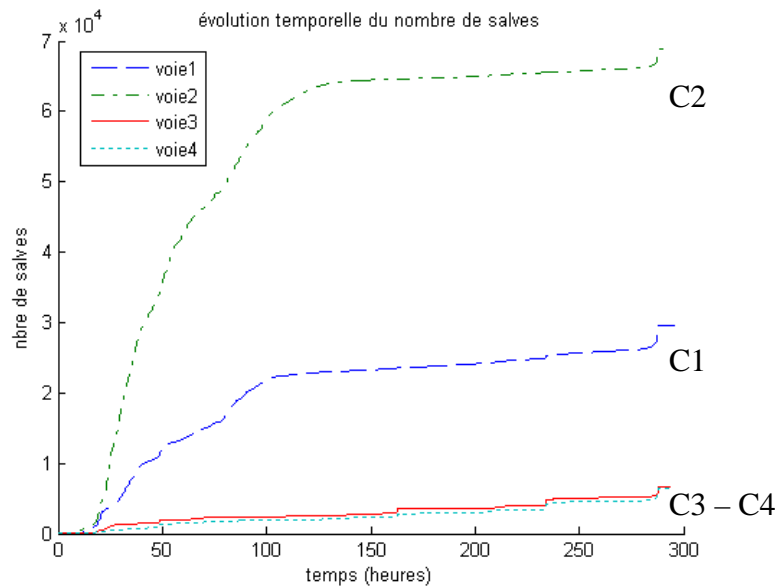


Figure 3: Nombre de salves cumulées en fonction du temps sur les quatre capteurs

La figure 4 présente le nombre de salves cumulées et leurs énergies cumulées en fonction du temps sur le capteur 2. L'énergie cumulée n'évolue pas de manière identique au nombre de salves. Au début de l'essai, l'énergie est faible. Elle commence à s'accroître vers 17 heures. A 110-120 heures, on observe un pic énergétique qui semble lié à des changements de mécanisme d'endommagement. L'augmentation de l'énergie est linéaire dans la phase 3 alors que dans la phase 4 elle s'exprime par un accroissement important et rapide.

Phase 1 : lorsque la solution corrosive est placée dans la cellule, de nombreuses salves d'EA de faible amplitude et faible énergie apparaissent. Cette phase, dans le cycle d'EA, correspond à la stabilisation du milieu éprouvette-solution.

Phase 2 : elle est caractérisée par l'augmentation importante du nombre de salves. Le mécanisme d'endommagement présent est alors l'éclatement des bulles d'hydrogène à la surface du câble. De nombreux travaux ont validés la capacité des systèmes d'EA à détecter les évolutions des bulles d'hydrogène [12][19][20][21]. De plus, Jomdecha et al. [22] montrent que lors de la corrosion sous contrainte, les fortes activités d'EA au début des essais sont dues à la formation de bulles d'hydrogène. Ces mécanismes sont à relier à la destruction de la couche pseudo-passive et au déclenchement de la pénétration de l'hydrogène dans la matrice métallique.

Phase 3 : cette phase stable est due au mécanisme de pénétration de l'hydrogène dans le matériau ce qui entraîne sa fragilisation.

Phase 4 : cette étape est très courte (< à 12 heures). Le mécanisme à l'origine des salves d'EA est la propagation des fissures. L'association d'une contrainte importante dans l'armature et de la fragilisation par l'hydrogène du matériau engendre ce phénomène. La propagation de fissure en CSC est appelée propagation sub-critique. En effet, la propagation est réalisée lorsqu'un volume de matière atteint un taux d'hydrogène critique. Le développement de la fissure suit donc une progression par à coups. Ce phénomène est visible sur l'évolution de l'énergie, le pic final étant la rupture d'un des fils du toron. L'énergie dégagée lors de la rupture est très importante, elle entraîne le décollement des capteurs piézoélectriques. Les deux autres ruptures ultérieures ne sont donc pas détectées par EA.

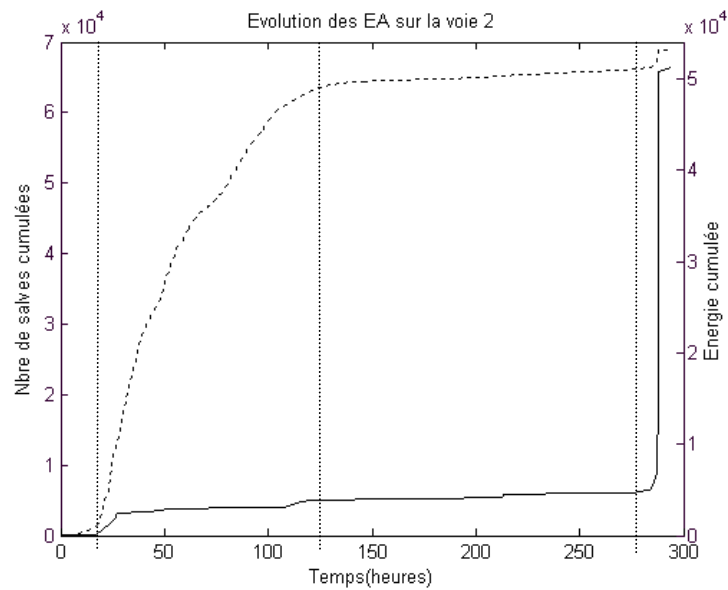


Figure 4: Nombre de salves cumulées et énergie cumulée en fonction du temps (capteur 2)

### III. 2. Activité acoustique localisée

La figure 5 présente la localisation de la première rupture survenue lors de l'essai. Elle est symbolisée par un pic énergétique à 0,135 m du capteur 1. Sur l'éprouvette, trois ruptures sont observées par analyse post-mortem. Elles sont localisées à 0,137, 0,142 et 0,139 m du capteur 1 ce qui montre que la localisation par EA des endommagements est fiable.

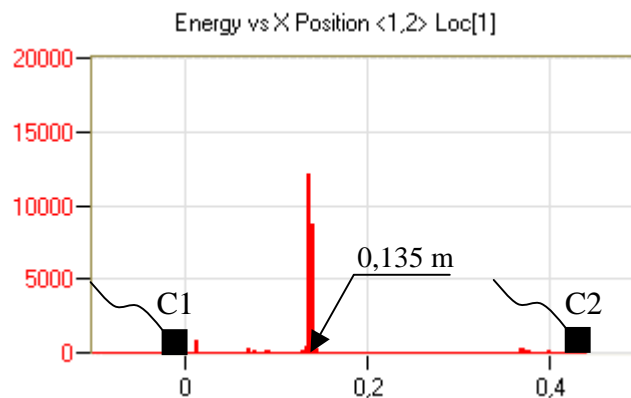


Figure 5: Localisation de la rupture (entre les capteurs 1 et 2)

Une localisation des événements d'EA sur la zone de rupture est présentée sur la figure 6. Les signaux de rupture ont été filtrés afin de mieux caractériser les mécanismes précédents la rupture. On retrouve sur cette zone localisée, le même processus mis en lumière lors de l'observation des salves d'EA sur les figures 4 et 5. L'activité acoustique est importante au début de l'essai (phase 2), puis à partir de 125 heures (450 000 secondes) elle devient

faible. Au-delà de 277 heures (928 000 secondes), le nombre d'EA commence à augmenter, et ce jusqu'à la rupture.

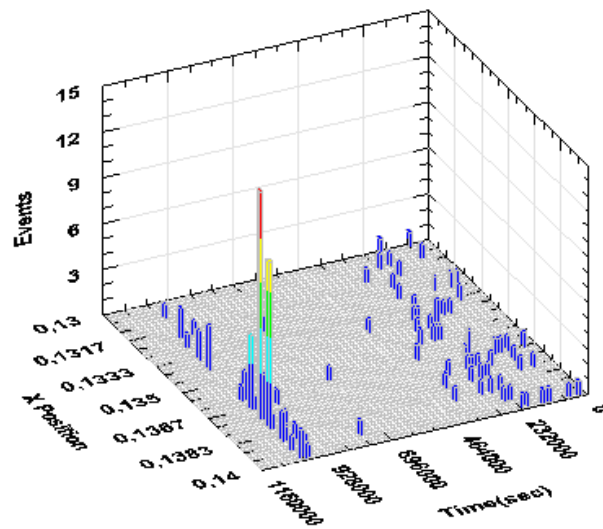


Figure 6: Evolution des émissions acoustiques sur la zone de rupture

La corrélation entre l'activité globale des EA sur la structure et l'activité localisée indique qu'une auscultation par localisation des endommagements n'est pas forcément nécessaire.

#### IV. CONCLUSION

La discrétisation des différentes phases d'endommagement d'un toron soumis à un essai de corrosion sous contrainte et à la fragilisation par l'hydrogène a pu être réalisée par EA. Certaines phases d'endommagement sont facilement observables puisqu'elles créent un accroissement important des paramètres d'EA.

D'autres mécanismes d'endommagement sont plus difficilement discernables comme la pénétration de l'hydrogène dans l'armature puisqu'elle n'est que peu émissive.

Le processus de propagation de fissure, caractéristique de l'endommagement par CSC, est un phénomène relativement bref (< à 12 heures). Sa détection sur ouvrage laisserait donc un temps de réactivité relativement court pour le gestionnaire d'ouvrage mais qui reste à relativiser dans le cas d'un essai accéléré de corrosion.

#### REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ACTENA (Auscultation des Câbles Tendus Non-Accessibles). Nous tenons à remercier notre partenaire Electricité De France (EDF) ainsi que l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Roget, J., Essais non destructifs : l'émission acoustique, mise en œuvre et applications, éditions AFNOR CETIM

- [2] Roget, J., Emission acoustique, Techniques de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôles, R 3200, pp. 1-10
- [3] Chaussin, R., Béton précontraint, Techniques de l'ingénieur, traité Construction, C2360, 1990, pp. 1-77
- [4] Jartoux, P., Fargeot, B., Tourneur, C., Béton précontraint : techniques de mise en œuvre, Techniques de l'ingénieur, traité construction, C2372, 1996, pp.1-34
- [5] Nürnberger, U., Corrosion induced failures on prestressing steel, Otto Graf Journal, N°13, 2002, pp. 9-25
- [6] Schroeder, R.M., Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement susceptibility of an eutectoid steel employed in prestressed concrete, Corrosion science, Vol. 45, 2003, pp. 1969-1983
- [7] Idrissi, H., Liman, A., Study and characterization by acoustic emission and electrochemical measurements of concrete deterioration caused by reinforcement steel corrosion, NDT&E International, Vol. 36, 2003, pp. 563-569
- [8] Darowicki, K., Mirakowski, A., Krakowiak, S., Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods, Corrosion science, Vol. 45, 2003, pp.1747-1756
- [9] Kovac, j., Leban, M., Legat, A., Detection of SCC on prestressing steel wire by the simultaneous use of electrochemical noise and acoustic emission measurements, Electrochimica Acta, Vol. 52, 2007, pp. 7607-7616
- [10] Idrissi, H., Derenne, J., Mazille, H., characterization and monitoring of pitting corrosion of aluminium alloys using the acoustic emission technique, Journal of Acoustic Emission, Vol. 18, 2000, pp. 409-416
- [11] Idrissi, H., Limam, A., Reliability of acoustic emission to assess corrosion of reinforced concrete, Journal of Acoustic Emission, Vol. 18, 2000, pp. 417-423
- [12] Fregonese, M., Idrissi, H., Mazille, H., Cetre, Y., Renaud, L., Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels : monitoring by acoustic emission technique, Corrosion science, Vol.43, 2001, pp. 627-641
- [13] Bellenger, F., Mazille, H., Idrissi, H., Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminium alloys exfoliation corrosion, NDT&E International, Vol. 35, 2002, pp. 385-392
- [14] 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, pp.2255-2261
- [15] Matsuyama, K., Fujiwara, T., Ashibashi, A., Ohtsu, M., Field application of acoustic emission for the diagnosis of structural deterioration of concrete, National conference on subsurface and civil engineering acoustic emission n°5, Kumamoto City, Japan, 1993
- [16] Zejli, H., Lacksimi, A., Tessier, C., Gaillet, L., Benmedakhen, S., Detection of the broken wires in the cables hidden parts (anchorings) by acoustic emission, Advanced Materials Research, Vol. 13-14, 2006, pp. 345-350
- [17] Brevet, P., Robert, J.L., Gaillet, L., Acoustic monitoring of pre-stressed concrete bridges and other civil structures with cables, Proceedings of the EWGAE 2002 European Working Group on Acoustic Emission, Prague, Czech Republic, Vol.1, 2002, pp. 11-13
- [18] Gaillet, L., Tessier, C., Bruhat, B., Michel, R., Auscultation par émission acoustique d'ancrages de câbles multicouches, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 2004, pp.55-63.
- [19] Ramadan, S., Idrissi, H., In situ monitoring of deposition and dissolution of calcium carbonate by acoustic emission techniques associated to electrochemical measurements, Desalination, Vol. 219, 2008, pp. 358-366



- [20] Didier-Laurent, S., Idrissi, H., Roue, L., In-situ study of the cracking of metal hydride electrodes by acoustic emission technique, *Journal of Power Sources*, In press, 2008
- [21] Yuyama, S., Hisamatsu, Y., Kishi, T., Nakasa, H., *Proceedings of the Fifth International Conference on Acoustic Emission*, Tokyo, 1980, p115
- [22] Jomdecha, C., Prateepasen, A., Kaewtrakulpong, P., Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types, *NDT&E International*, Vol. 40, 2007, pp. 584-593