
Reconstruction du profil 3D de fissure dans le béton par émission acoustique

Antoine Boniface, Zoubir Mehdi Sbartai, Jacqueline Saliba

Institut de Mécanique et d'Ingénierie département Génie Civil et Environnemental (I2M GCE) – UMR CNRS 5295

RÉSUMÉ. Le suivi d'endommagement du béton par émission acoustique (EA) est parmi les seules techniques qui permettent de détecter et de localiser les micros-endommagements qui surviennent lorsque les capacités de résistance locales du matériau sont dépassées. Cette localisation s'effectue à partir de l'analyse des temps de vol des ondes élastiques reçues par un ensemble de capteurs disposés sur la surface du matériau. L'utilisation de différentes hypothèses pour effectuer cette localisation conduit à une importante incertitude sur la position des micros-endommagements. Nous proposons ici de corriger deux de ces problèmes. Enfin, un traitement statistique des cartes de micros-fissurations basé sur la densité spatiale d'endommagement est proposé dans le but de reconstruire le profil de fissuration du béton.

ABSTRACT. The monitoring of concrete structures with the acoustic emissions (AE) technique allows the detection of damage onset and growth. The source location is determined by triangulation algorithm which makes use of AE signals arrival time recorded by sensors placed at the surface of the material and wave velocity. The accuracy of AE source location depends on many assumptions. In this paper, the accuracy related to the choice of the onset detection of AE signals and to location algorithms is studied. A statistical treatment of AE location maps based on the spatial density of damage is proposed in order to reconstruct the 3D crack profile in concrete beams. The accuracy of AE location is then evaluated by comparing the reconstructed profiles obtained with the AE technique and the real crack profile obtained with laser rugosimeter.

MOTS-CLÉS : émission acoustique, béton, fissuration, localisation de source.

KEY WORDS: acoustic emission, concrete, fracture, source location.

1. Introduction

Le suivi d'endommagement des ouvrages d'art et des structures nucléaires est un sujet de préoccupation majeur dans le domaine du génie civil. La fissuration est un sujet d'attention particulier de par l'impact que peut avoir ce type d'endommagement sur la durée de vie restante des structures et les risques qui peuvent en découler. Dans le cas d'un matériau quasi-fragile comme le béton, la fissuration intervient après le développement d'une zone de microfissurations (appelée FPZ pour « fracture process zone ») dans le matériau. Les travaux traitant de la FPZ sont nombreux [HAD 04] [ALA 13] [JAN 90] [SHA 90] [SBA 14] avec pour principal objectif son dimensionnement dans le but d'alimenter les modèles d'endommagement. L'accumulation des microfissures entraîne un affaiblissement local des caractéristiques mécaniques du matériau propice à la propagation de fissures.

La microfissuration est un phénomène d'endommagement localisé qui se manifeste par la libération d'énergie mécanique. Il résulte de cet événement mécanique, la propagation d'une onde élastique dans le matériau. La technique d'émission acoustique (EA) permet d'enregistrer les vibrations issues de ces événements grâce à un réseau de capteurs piézoélectriques placé sur la surface du matériau. Le principal intérêt de l'EA est qu'elle permet de suivre l'endommagement d'une structure en continu. Elle permet aussi, à travers l'analyse des temps de vol des ondes, de localiser par triangulation les microfissurations et donc in-fine d'identifier les zones faibles d'une structure qui sont susceptibles d'être les lieux de propagation de fissures. Différentes techniques de localisation existent, [KOC 11] propose entre autre de localiser les micros endommagements grâce au retournement temporel à partir des données d'EA. Cette technique est néanmoins difficile à mettre en œuvre sur des structures trop grande en raison de la nécessité de simuler la propagation d'ondes à travers un modèle éléments finis.

La technique de localisation par triangulation est maîtrisée [OHT 88]. Néanmoins, la qualité des résultats qu'elle procure est sensible à différents critères [OHN 14]. Premièrement, l'approximation 2D peut avoir un impact sur la qualité de la localisation dans le cas des poutres ayant une épaisseur assez importante. En effet, la propagation des ondes et la localisation de leurs sources est un problème de volume or, le principe de la triangulation consiste à réduire une erreur entre les données mesurées et celles issues d'une source dont la position est connue. La recherche d'une position dans un plan conduit donc à une erreur importante sur la position. La principale conséquence de cette approximation est une mauvaise représentation de la carte d'endommagement de la structure étudiée. Un autre critère important pour effectuer une bonne localisation est la manière dont est défini le début d'une salve d'EA reçue par un capteur. La triangulation s'effectue à partir des retards entre les capteurs. Ces retards sont calculés à partir des temps auxquels ont été détectés les différents signaux. Les techniques permettant de définir le début d'une salve sont nombreuses [CAR 12] Enfin, si le principe de la localisation est toujours le même, la manière avec laquelle est résolue le problème de minimisation influe sur le résultat final. L'algorithme des simplex est le plus répandu pour sa précision et sa rapidité d'exécution. Néanmoins, cette technique permet seulement de converger vers un minimum local du problème de minimisation et peut donc conduire, dans certains cas, à une solution erronée.



Figure 1. Essai de flexion 3 points.

Dans le but de mieux comprendre l'influence des problèmes soulevés ci-dessus, des essais de flexion 3 points ont été menés sur des poutres de béton entaillées. Le suivi de l'endommagement est effectué à l'aide de la technique d'émission acoustique. La première partie du travail qui suit consiste à fiabiliser la localisation des micros-endommagements. Deux critères d'évaluation du début de chaque salve d'EA sont présentés. Leur influence sur le résultat global de la localisation est mise en évidence. Par la suite, une alternative est proposée pour pallier les faiblesses de l'algorithme couramment utilisé dans la résolution du problème de localisation. Les avantages et inconvénients des deux méthodes sont discutés. Enfin une méthode de reconstruction du profil de fissure est présentée. Elle se base sur l'évaluation de la densité des micros-endommagements dans la structure. La comparaison entre le profil reconstruit et celui mesuré à l'aide d'un rugosimètre est présentée. La précision et les possibilités d'amélioration de la technique d'EA sont discutées.

2. Matériaux et dispositif expérimental

2.1. Matériaux et flexion 3 points

Les éprouvettes en béton, dont la composition est présentée dans le tableau 1, sont de dimensions : $L \times h \times l = 500 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$. L'entaille de 1mm d'épaisseur est située au centre de l'éprouvette et mesure 50mm de hauteur.

Constituants	Proportions massique
Ciment CEM II 32,5	400kg.m ⁻³
Eeau	215kg.m ⁻³
Sable 0-5	590kg.m ⁻³
Gravier 5-12,5	1175kg.m ⁻³

Tableau 1. Composition du béton.

L'essai de flexion 3 points est assuré par une presse électromécanique MTS de capacité maximale 50kN (figure 1). Le chargement de l'éprouvette est effectué avec une vitesse d'ouverture d'entaille constante de 0.3mm.min⁻¹. L'ouverture prise en compte est la moyenne mesurée par deux capteurs LVDT placés sur les deux faces principales de la poutre.

2.2. Suivi de l'endommagement par émission acoustique

Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide d'un réseau de capteurs piézoélectriques Nano30 de fréquence de résonance égale à 250kHz. Les deux faces principales de l'éprouvette ont été instrumentées à l'aide de 4 capteurs de manière à pouvoir effectuer une localisation des événements acoustique en 3D. Une fréquence d'échantillonnage de 1MHz a été utilisée pour l'acquisition des signaux préalablement amplifiés par des préamplificateurs de 40dB. Les signaux sont ensuite convertis par une carte PCI-8 puis filtrés par un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est 400kHz et un filtre passe-haut dont la fréquence de coupure est de 100kHz. Le seuil de détection des signaux a été fixé à 40dB. Les signaux (ou hits) sont ensuite regroupés par le logiciel AEwin (Mistras Group) en événements acoustiques en se basant sur leurs temps d'arrivée. Ainsi un ensemble de signaux ayant été reçus par des capteurs (minimum 4) différents et dans un laps de temps de 40 microsecondes forment un événement. Cette fenêtre temporelle correspond à une distance de propagation de 15cm couvrant l'ensemble de la zone d'endommagement ciblée. La vitesse de propagation des ondes est de 3500m.s⁻¹, elle a été mesurée à l'aide de casser de mines (Nielson, 1989 [x]).

2.3. Mesure du profil de fissure

Le profil de fissure mesuré a été obtenu sur une des deux faces de la fracture après la rupture de l'échantillon à l'aide d'un rugosimètre (figure 2). Cette technique consiste à mesurer la distance entre l'appareil de mesure et la surface d'auscultation à l'aide d'un laser. Un pas de 1mm a été choisi entre chaque point de mesure afin d'obtenir une carte suffisamment précise.

3. Résultats et discussions

L'ensemble des traitements présentés ci-dessous ont été effectué sur Matlab à partir des données acquises à l'aide du système d'acquisition Mistras composé d'une carte PCI8 et 8 capteurs Nano30.

3.1. Redéfinition du début des salves d'EA

La détermination du début des salves d'EA a été identifiée comme une source d'erreur sur la localisation. En effet, l'ensemble des retards mesurés entre les capteurs est influencé par la méthode de détermination du début

des salves. L'acquisition des données utilisées dans ce travail a été effectuée en utilisant un seuil fixe. Cette technique définit le début d'une salve comme le moment auquel l'amplitude reçue par le capteur dépasse un seuil préalablement établi (ici 40dB). L'inconvénient de cette technique est qu'elle ne s'adapte pas à chaque signal. La figure 3 illustre ce problème, on observe pour un signal de faible amplitude maximale un décalage entre le début de la salve établi par la méthode du seuil fixe (en magenta) et le début apparent de la salve.

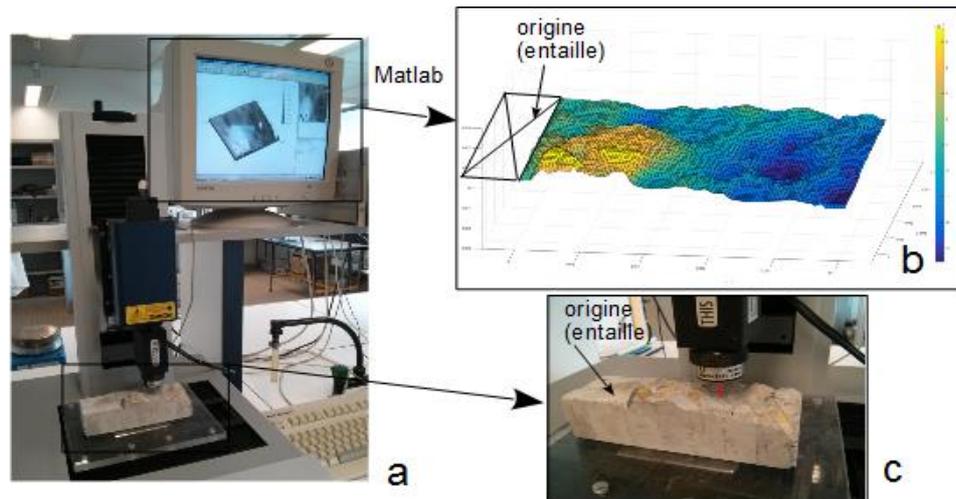


Figure 2. Rugosimètre (a). Type de carte obtenue à partir du traitement par rugosimètre (b). Profil de fissure mesuré. Le profil plat de l'entaille sert de référence aux altitudes positives (jaunes) et altitudes négatives (bleues) (c).

Dans le but de fiabiliser la localisation, la méthode du seuil flottant a été utilisée pour définir le début d'une salve. Ainsi, chaque signal possède son propre seuil permettant de déterminer son temps d'arrivée. Dans notre cas il a été fixé à 15% du maximum d'amplitude, le début d'une salve correspond au premier pic dépassant cette limite. Le résultat de ce choix est illustré sur la figure 3 (en noir), on observe un décalage de 9 microsecondes entre les deux méthodes. Si la définition du début de la salve semble meilleure avec cette technique, elle ne s'avère pas efficace dans toutes les situations. Chaque méthode possède ses avantages et répond à un besoin différent. Dans notre cas, une attention particulière a été portée à la conservation de l'ensemble des événements enregistrés pour travailler sur les cartes de localisation. L'utilisation du seuil flottant a donc été retenue pour sa capacité à améliorer la détermination du début des salves dont l'amplitude maximale est relativement faible (~45-50dB). Ces événements de faibles amplitudes constituent la majeure partie de ceux enregistrés au cours d'un essai.

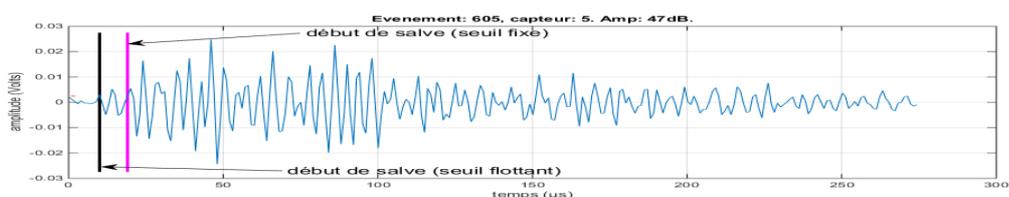


Figure 3. Exemple de détermination du début d'une salve d'EA selon deux méthodes. Seuil fixe (magenta) et seuil flottant (noir).

La figure 5 illustre l'influence du choix de ce critère sur la carte de localisation pour deux méthodes de résolution du problème de localisation (voir paragraphe 3.2). On observe une concentration des événements acoustiques dans la zone de fissuration qui se situe au-dessus de l'entaille.

3.2. Localisation par maillage adaptatif

3.2.1. Principe de résolution du problème de minimisation

La localisation des micro-endommagements consiste à résoudre un problème de minimisation d'erreur entre les données reçues par les capteurs et celles issues d'un événement artificiel dont on connaît la position. La

position retenue correspond à celle de l'événement artificiel pour lequel le critère d'erreur est égal à 0. L'équation de la figure 4b représente le critère d'erreur à minimiser.

Les méthodes usuelles de localisation utilisent l'algorithme des simplex pour résoudre le problème de minimisation d'erreur. Cet algorithme consiste, à partir d'une position initiale positionnée aléatoirement, à converger vers le minimum local du critère d'erreur en modifiant la position de l'événement artificiel. Le principal avantage de cette méthode est sa rapidité. En revanche elle nécessite d'entrer une position initiale dont peut grandement dépendre le résultat. De plus, l'algorithme peut converger vers une solution correspondant à un événement situé en dehors de la structure étudiée. Le travail qui suit repose sur une autre méthode de localisation. La position d'un événement n'est plus définie à partir d'une position initiale mais à partir d'un ensemble de positions couvrant la zone d'endommagement visée. La figure 4a présente un exemple de calcul d'erreur entre un événement fictif sur le nœud du maillage utilisé et le jeu de données mesuré d'un événement dont on cherche la position. Cette erreur est calculée pour chaque nœud du maillage. La position retenue pour l'événement mesuré correspond à celle du nœud pour lequel l'erreur est la plus faible.

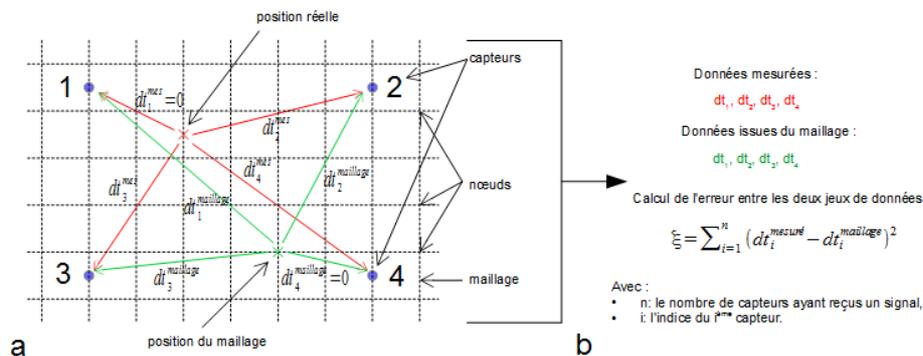


Figure 4. Principe de recherche de la position d'un événement acoustique selon la méthode du maillage (a). Critère d'erreur à minimiser entre la mesure et l'événement « artificiel » du maillage (b).

Pour augmenter la précision et réduire le coût en temps de calcul de cette technique, trois maillages successifs sont utilisés pour déterminer la position d'un seul événement. Ainsi, le premier maillage couvre une large zone entourant les capteurs avec une maille grossière de l'ordre du centimètre. Un nouveau maillage plus resserré est ensuite utilisé autour de la position retenue précédemment. Cette opération est répétée jusqu'à obtenir une solution dans un maillage dont les nœuds sont espacés de 3 millimètres. Cette adaptation du maillage permet de ne manipuler que des matrices de faibles dimensions dans le but de rendre l'opération plus rapide.

Le principal avantage du maillage est d'éviter les problèmes de minimums locaux puisqu'un grand nombre de solutions sont calculées et comparées afin de retenir celle qui minimise le mieux le critère d'erreur. L'inconvénient de cette technique est le temps de calcul nécessaire pour déterminer la position d'un événement. Il est entre 5 et dix fois plus élevé que pour l'algorithme des simplex. Il faut noter que cet inconvénient n'est pas très significatif dans notre cas puisque la minimisation des erreurs pour la localisation de l'ensemble des événements (4792 dans notre cas) est de l'ordre de 5 minutes.

3.2.2. Résultats de la localisation

La figure 5 montre les cartes de localisation et les histogrammes du nombre d'événements dans chaque direction (x,y,z) issue des deux méthodes de minimisation d'erreur. Chaque point bleu représente un événement parmi les 4792 enregistrés par le système d'acquisition. Aucun filtre n'a été appliqué aux données. Les résultats sont ceux de deux méthodes de minimisation différentes sur le même jeu de données. Le critère d'erreur à minimiser est strictement identique dans les deux cas.

La principale différence entre les deux méthodes est la quantité d'événements localisés à l'extérieur de l'éprouvette (voir tableau 2). Sont considérés à l'extérieur de l'éprouvette, tous les événements qui sont localisés sur ses frontières et en dehors de son volume.

	Seuil flottant	Seuil fixe
Maillage	20,20%	27,46%
Simplex	52,23%	73,96%

Tableau 2. Proportions d'événements localisés à l'extérieur de l'éprouvette.

3.3. Reconstruction du profil de fissure à partir des données d'EA

3.3.1. Principe de reconstruction du profil de fissure

La reconstruction du profil de fissure se base sur les cartes de localisation obtenues en utilisant la méthode du maillage et avec l'utilisation du seuil flottant (voir paragraphe 3.2.2). La technique utilisée consiste à scanner la carte de localisation et évaluer la densité des événements en différents points. Le résultat est une matrice 3D (de taille n_x, n_y, n_z) dont chaque point est le centre d'une sphère d'un cm^3 . La valeur associée à chaque point correspond au nombre d'événements localisé dans cette sphère (figure 6b). Le profil est ensuite construit en reliant les points de densités maximales de la manière suivante (figure 6a):

- Dans un premier temps la densité maximale de chaque ligne est repérée pour chaque plan.
- Ensuite les points repérés précédemment sont reliés sur un même plan pour former un profil de fissure à 1 dimension.
- Enfin l'ensemble de ces profils sont reliés les uns aux autres plan par plan pour former un profil en 2 dimensions.

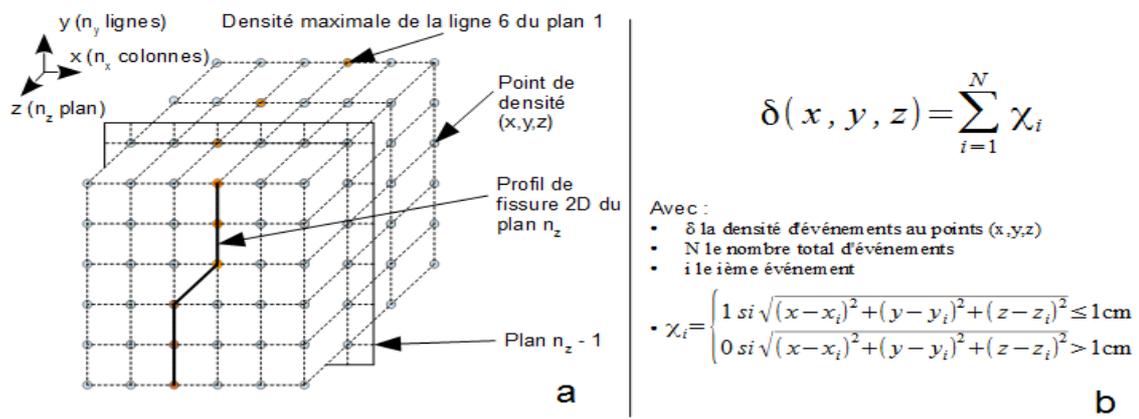


Figure 6. Principe de reconstruction du profil de fissure.

3.3.2. Résultats de la reconstruction

Les profils de fissures reconstruits et mesuré sont présentés sur les figures 7a 7b et 7c. L'échelle est identique pour les trois profils. Les couleurs représentent l'écart par rapport à l'axe de l'entaille. On observe une différence des amplitudes maximales entre les profils reconstruits et le profil mesuré. Néanmoins, la forme de la fissure est globalement respectée par rapport à la mesure. La comparaison des profils s'effectue par simple soustraction, le résultat est présenté sur les figures 7d et 7e.

Les erreurs sont relativement faibles avec un maximum à 2cm en certains points. Néanmoins les écarts calculés sont inférieurs à 1cm sur 83% de la surface pour la méthode du maillage et 98% de la surface pour la méthode des simplex.

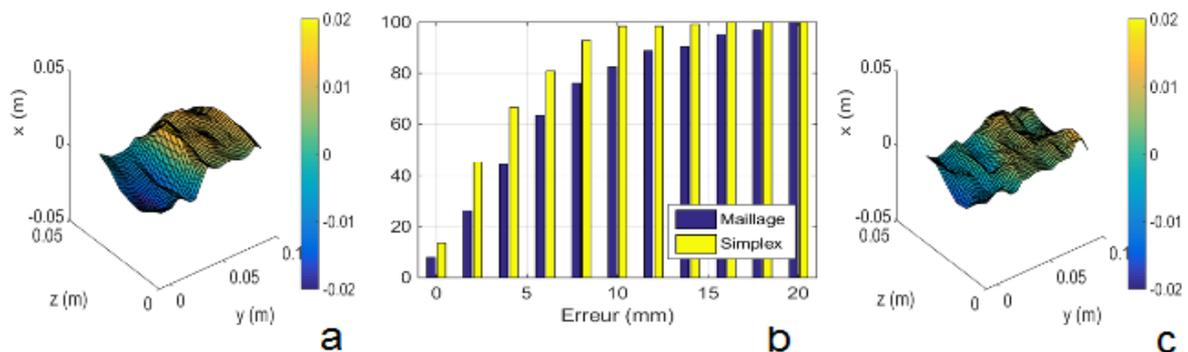


Figure 7. Profils de fissures reconstruits par maillage (a), par simplex (c). Histogramme cumulé de la proportion de surface pour laquelle l'erreur avec le profil mesuré est inférieure à la valeur indiquée (b).

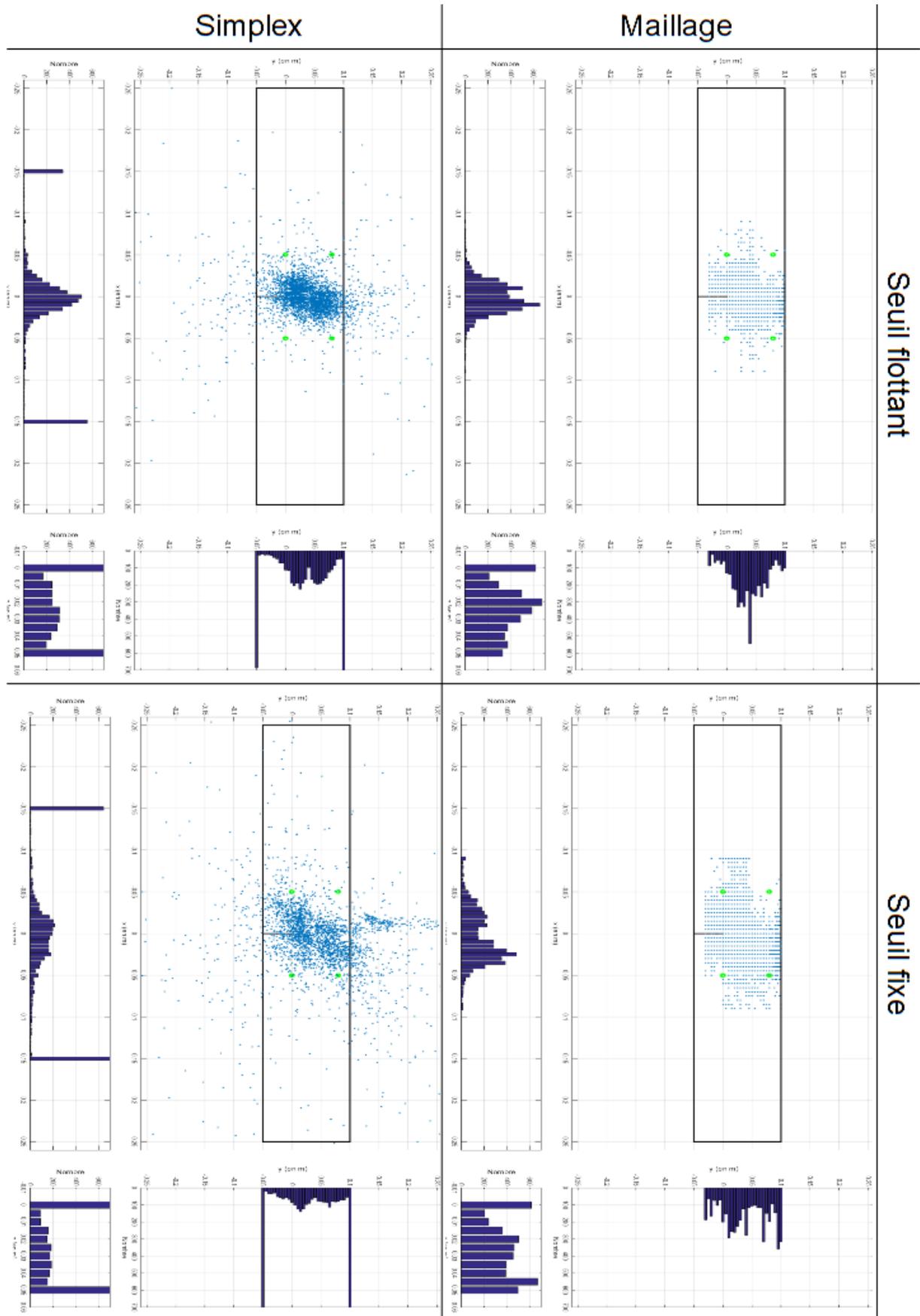


Figure 5. Vues des cartes de localisation issues de différentes méthodes de minimisation de l'erreur et de critères de début de salve différents (vu d'une face principale de l'éprouvette).

4. Conclusion

L'objectif principal du travail présenté dans ce document est de reconstruire le profil de fissure en se basant sur la carte de localisation des événements acoustiques. Dans un premier temps, deux techniques de fiabilisation de la localisation ont été proposées. Ainsi, l'influence du critère permettant d'évaluer le début d'une salve d'EA sur la carte de localisation a été montrée. L'utilisation de ce critère est justifiée par son efficacité sur les salves de faibles amplitudes qui représentent une grande partie des signaux enregistrés. D'autre part, la quantité d'événements localisés à l'intérieur de l'éprouvette est impactée de manière significative lorsque le seuil flottant est utilisé. Toujours dans le but de fiabiliser la localisation, une méthode de résolution du problème de minimisation d'erreur par maillage adaptatif est proposée afin de pallier les faiblesses de l'algorithme des simplex. Si autour de la fissure la répartition des événements est globalement identique pour les deux méthodes, la technique de maillage permet de localiser un nombre plus important d'événements à l'intérieur de l'éprouvette.

En se basant sur les résultats décrits ci-dessus, une technique de reconstruction du profil de fissure est proposée. Elle se base sur une hypothèse partagée dans la littérature selon laquelle la fissure serait le résultat d'une forte concentration de micro-endommagements. Ainsi les zones les plus densément endommagées correspondraient aux lieux de propagation de la fissure. Les résultats obtenus avec la technique de reconstruction utilisée montrent un bon accord entre les profils reconstruits et celui mesuré. Les vecteurs d'amélioration de la méthode employée sont multiples et passent dans un premier temps par une localisation plus fiable. L'utilisation du critère d'Akaike pour déterminer le début des salves, la prise en compte de la modification des vitesses de propagation des ondes au cours de l'endommagement en font partie.

5. Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet ANR ENDE. L'Agence National de la Recherche est remerciée pour le soutien financier ainsi que l'ensemble des partenaires du projet ENDE.

6. Bibliographie

- [ALA 13] Alam S. Y., Saliba J., Loukili A., « Study of evolution of fracture process zone in concrete by simultaneous application of digital image correlation and acoustic emission », *VIII International conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures FraMCoS-8*, Toledo 2013.
- [CAR 12] Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., Manuello A., « Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures », *Cement and concrete composites*, 2012.
- [HAD 04] Hadjab H., Thimus J.-Fr., « Fracture process zone in notched concrete beams treated by using acoustic emission », *NDT*, vol. 12, 2004.
- [JAN 90] Jankowski L. J., « Formation of the fracture process zone in concrete », *Engineering fracture mechanics*, vol. 36, n° 2, 1990, p. 245-253.
- [KOC 11] Kocur G. K., Vogel T., Saenger E. H., « Crack localization in a double-punched concrete cuboid with time reverse modeling of acoustic emissions », *International Journal of Fracture*, 2011.
- [OHN 14] Ohno K., Kimitaka U., Ueno A., Ohtsu M., « Fracture process zone in notched concrete beam under three-point bending by acoustic emission », *Construction and building materials*, 2014.
- [OHT 88] Ohtsu M., Ono K., « AE source location and orientation determination of tensile cracks from surface », *NDT International*, vol. 21, n° 3, 1988.
- [SHA 90] Shah S. P., « Experimental methods for determining fracture process zone and fracture parameters », *Engineering fracture mechanics*, vol. 35, n° 1/2/3, p. 3-14, 1990.
- [SBA 14] SBARTAÏ ZM, SAÏDOUN K., « Evaluation de l'endommagement mécanique des bétons par émission acoustique ». *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, Janvier-Mars 2014.