



HAL
open science

Détection de l'endommagement mécanique par ultrasons

Mehrdad Emami Tabrizi, Bernard Halphen, Minh-Phong Luong,
Jean-Christophe Eytard

► **To cite this version:**

Mehrdad Emami Tabrizi, Bernard Halphen, Minh-Phong Luong, Jean-Christophe Eytard. Détection de l'endommagement mécanique par ultrasons. CFM 2009 - 19e Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391340

HAL Id: hal-03391340

<https://hal.science/hal-03391340v1>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Détection de l'endommagement mécanique par ultrasons

M. EMAMI TABRIZI, M. P. LUONG, B. HALPHEN, J.C. EYTARD

Laboratoire de Mécanique des Solide (LMS), Génie civil, Ecole Polytechnique, 91128 PALAISEAU

Résumé :

Cette communication présente une technique non destructive basée sur des caractéristiques de propagation d'ondes ultrasonores pour détecter l'endommagement dans les géomatériaux fragiles. Cette dernière utilise une technique de mise en œuvre spéciale de détection et une procédure de réduction de données spécifique pour analyser l'évolution des signaux d'impulsions d'ondes ultrasonores se propageant dans l'échantillon soumis à des chargements croissants en compression uniaxiale.

Abstract :

This paper introduces a specific non destructive technique based on the evolution of ultrasound propagation characteristics through geomaterials. It allowed the detection of a threshold of material damage. This monitoring method uses a special testing technique to detect the occurrence of nonlinear characteristics of ultrasound propagation and a specific data reduction procedure to analyze the signal evolution of ultrasound pulses propagating through the specimen subjected to increasing axial compressive loading.

Mots clefs : endommagement, ultrasons, matériaux fragiles, non destructive, émission acoustique

1 Introduction

L'aspect le plus saillant du comportement mécanique des géomatériaux fragiles (béton, roche, ...) provient de leur microfissuration interne qui produira la rupture [1]. En effet, la fissuration est à la fois l'élément distinctif et celui qui commande l'essentiel du comportement mécanique de ces milieux. De plus, la rupture dans ces matériaux est le plus souvent précédée d'un changement spontané du mode de déformation qui peut être le résultat d'une localisation des déformations [2,3]. Ce phénomène est vu comme une instabilité matérielle dans une théorie de mode localisé. On peut relier la localisation de la déformation à l'apparition de discontinuités de la vitesse du gradient de déplacement le long d'une certaine direction [2].

Les méthodes classiques utilisées à cet effet sont essentiellement basées sur la mesure des déformations globales. Or la sensibilité et la précision de ce type de mesure sont assez faibles ; la densité de fissuration doit atteindre des valeurs relativement élevées avant que ses effets soient repérables en terme de déformations [4,5]. On peut ainsi déceler des émissions acoustiques (EA) [6, 7]. L'écoute des émissions acoustiques donne une information plus précoce que celle de l'ouverture des fissures, mais l'interprétation des résultats reste toujours une affaire délicate. Cela est dû au fait que la majorité d'évènements d'émission acoustique se produisent juste avant la rupture. Le manque d'activité significative d'EA aux étapes initiales du chargement cause la difficulté à distinguer le bruit de fond et des évènements acoustiques reliés à la fissure [4]. Les techniques utilisant les ondes ultrasonores sont particulièrement intéressantes grâce à la relation directe entre les caractéristiques de la propagation des ondes et le niveau d'endommagement du matériau [8].

Cette communication présente une technique non destructive basée sur l'évolution des caractéristiques de propagation d'ondes ultrasonores pour détecter l'instabilité matérielle dans un échantillon fragile, fournissant un premier avertissement très utile pour la surveillance des structures dans les milieux à risque. Une évaluation non destructive d'instabilité matérielle sur quelques échantillons de grès sous chargement en compression simple a été réalisée avec succès en laboratoire. Une entrée-sortie non-paramétrique basée sur la propagation d'impulsions ultrasonores et un analyseur non linéaire pour le traitement de données ont été choisis pour étudier le comportement mécanique d'une éprouvette soumise à un chargement statique. Basé sur le développement des signaux ultrasonores en série de Volterra, l'analyseur non linéaire permet de séparer les parties linéaires et non-linéaires. Cette analyse est très utile puisque l'apparition de la non

linéarité de propagation d'ondes correspond à l'occurrence de la microfissuration du matériau. Elle pourra être utilisée pour contrôler l'apparition des processus d'endommagement des géomatériaux fragiles de façon non destructive et continue pour que les mécanismes d'endommagement puissent être quantitativement évalués par un paramètre adimensionnel appelé taux de non-linéarité, ou par un contraste de non-linéarité de propagation d'ondes.

2 Méthode proposée

La réponse dynamique $y(t)$ du système à l'excitation $x(t)$ se décompose en séries de Volterra de la façon suivante [9, 10]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{j=N} y_i(t) = \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} k_i(\tau_1, \dots, \tau_i) \prod_{i=1}^{j=n} x(t - \tau_i) d\tau_i \quad (1)$$

où $y_i(t_1, t_2, \dots, t_i)$: réponse d'ordre i à i variable de temps ; $k_i(t_1, t_2, \dots, t_i)$: noyaux de Volterra ou réponse impulsionnelle d'ordre i .

Ces séries résultent de la somme des réponses aux divers ordres par convolution de l'excitation avec la réponse impulsionnelle du système. Dans cette équation, y_1 correspond à la composante linéaire de la réponse, tandis que les autres termes correspondent aux composantes non linéaires. L'élaboration des noyaux de Volterra permet la caractérisation du système en séparant les parties linéaires et non linéaires de la réponse dynamique. Il convient de noter que les noyaux dépendent purement du système lui-même, et de là indépendant de l'excitation.

Lorsque l'excitation est transitoire $x(t) = B\varphi(t)$, présentant toujours la même forme quelle que soit son amplitude B , le développement de l'équation (1) devient :

$$y(t) = +B \int_{-\infty}^{+\infty} h_1(\tau_1) \varphi(t - \tau) d\tau + B^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) \varphi(t - \tau_1) \varphi(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\ + \dots + B^n \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^{i=n} \varphi(t - \tau_i) d\tau_i \quad (2)$$

ou
$$y(t) = B k_1(t) + B^2 k_2(t) + \dots + B^i k_i(t) \quad (3)$$

Avec les pseudo noyaux temporels $k_i(t)$ tels que :

$$k_1(t) = h_1 * \varphi \quad k_2(t) = h_2 * \varphi * \varphi \quad k_i(t) = h_i * \underbrace{\varphi * \dots * \varphi}_{i \text{ fois}} \quad (4)$$

L'activation des phénomènes non linéaires provoque des valeurs non nulles à ces pseudo noyaux d'ordre supérieur. Pour un système non linéaire, la non linéarité (telle que l'instabilité, la microfissuration ou l'endommagement, etc.) se traduit par une augmentation de l'amplitude des pseudo noyaux d'ordre supérieur.

La méthode proposée vise à évaluer la signification des termes non linéaires dans la réponse globale. Si ces aspects non linéaires montrent une augmentation soudaine, elle sera associée à l'occurrence de l'instabilité matérielle provoquant le comportement non linéaire.

2.1 Taux de non linéarité

Un paramètre quantitatif simple sur lequel un critère pourrait être appliqué est nécessaire pour caractériser la réaction de système. La détermination des noyaux donne l'accès aux différents termes de la série, et à leurs énergies [10]. L'énergie E_m^i , composante à l'ordre i de $y(t)$ pour l'excitation à l'ordre m :

$$E_m^i = \int_0^{\infty} y_i^{(m)}(t)^2 dt \quad (5)$$

La non linéarité de phénomène peut être quantifiée en comparant ces énergies. Pour évaluer les contributions non linéaires dans la réponse globale, le taux de non linéarité r_m pour l'excitation à l'ordre m est défini de la façon suivante:

$$r_m = \frac{\sum_{i=2}^N E_m^i}{\sum_{i=1}^N E_m^i} = \frac{\text{énergie non linéaire}}{\text{énergie totale}} \quad (6)$$

D'après les équations (2), (3) et (5), on peut introduire les pseudo noyaux dans cette équation (6). Le taux de non linéarité s'écrit alors de la façon suivante :

$$r_m = \frac{\sum_{i=2}^N B^{2i} \eta_i}{\sum_{i=1}^N B^{2i} \eta_i} \quad \text{avec : } \eta_i = \int_0^{\infty} h(t, t, \dots, t)_i^2 dt \quad (7)$$

Cette fonction exprime le pourcentage énergétique des composantes non linéaires du système en réponse à une excitation d'impulsion d'amplitude B.

3 Validation expérimentale

La méthode proposée a été appliquée en laboratoire sur des matériaux fragiles comme le grès des Vosges. Afin de s'affranchir des problèmes de conditions limites et dans le but de localiser l'endommagement, une forme d'échantillon amincie a été privilégiée par rapport aux formes classiquement utilisées dans les études de comportement (figure 1). Les échantillons carottés sont soumis à des chargements statiques croissants en compression uniaxiale.

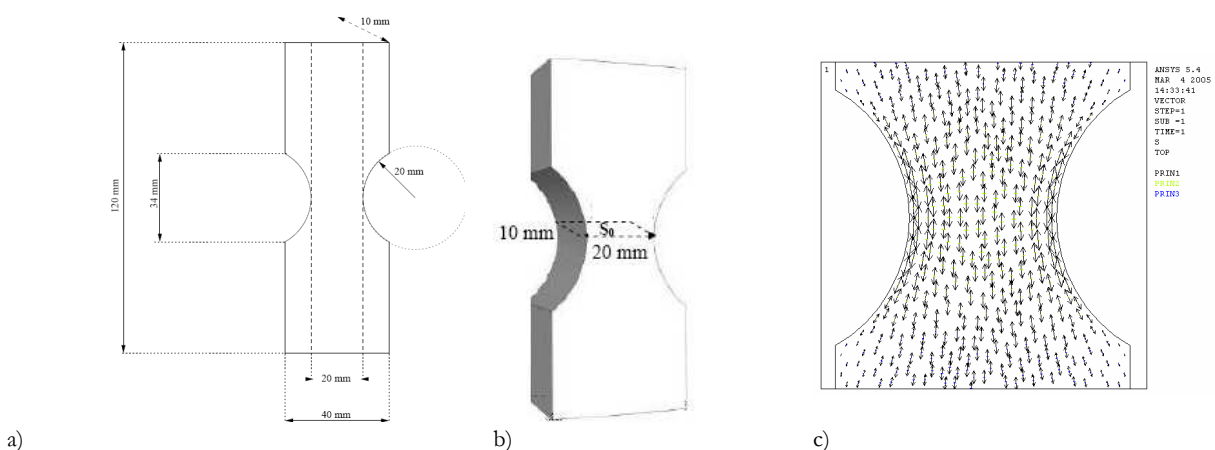


FIG. 1 – a,b) Géométrie et dimension de échantillon, c) distribution des contraintes principales dans la partie centrale de l'éprouvette.

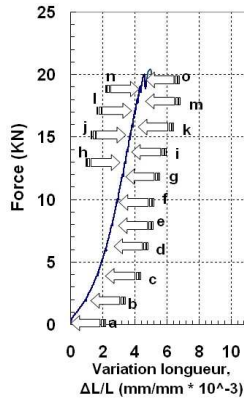
La technique de transmission d'impulsions, à l'aide des capteurs piézoélectriques V150 (Panametrics : onde de cisaillement, 0.250 MHz) et S140B (Endevco : onde de compression, 0.1 MHz), a été appliquée en tant qu'essai non destructif. Le générateur d'impulsions produit une impulsion électrique pour exciter un capteur piézoélectrique, qui émet une impulsion ultrasonore. L'impulsion traverse l'échantillon sous chargement en compression uniaxiale. Un deuxième capteur agit comme récepteur. Le capteur convertit les impulsions en signaux électriques permettant l'analyse non linéaire. Trois impulsions d'entrée ont été générées à des niveaux d'amplitude proportionnels. Les signaux de réponse à différents niveaux de force statique ont indiqué l'évolution de la réponse de l'impulsion ultrasonore à travers l'échantillon en compression (figure 2).

Un traitement spécifique des signaux de sortie permet d'évaluer le ratio entre l'énergie non linéaire par rapport à l'énergie totale, et le contraste de non linéarité en fonction du niveau de force réduite, définie comme le rapport de la force statique actuelle appliquée sur la force maximale à la rupture (figure 3). Ils ont montré l'occurrence de la microfissuration et la possible apparition de la localisation des déformations le long d'une certaine direction avant la rupture. Le changement de pente du taux de non linéarité suggère que l'échantillon quasi fragile présente trois comportements tout à fait différents sous chargement en compression (figure 3) : la première partie est quasi élastique et stable, la deuxième partie montre à partir de quel niveau de la force réduite l'échantillon devient localement instable (S_{nl1}) et la troisième peut mener à une rupture soudaine provoquée par l'extension de la zone instable (S_{nl2}) qui produit des effets non linéaires

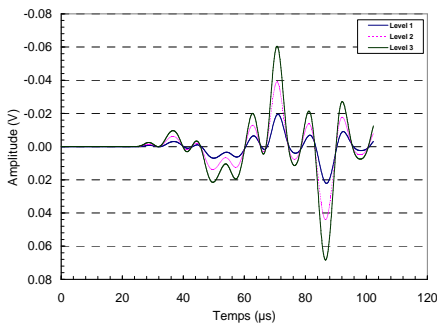
affectant les mécanismes de propagation d'ondes ultrasonores.

a) Courbe de force-déformation.

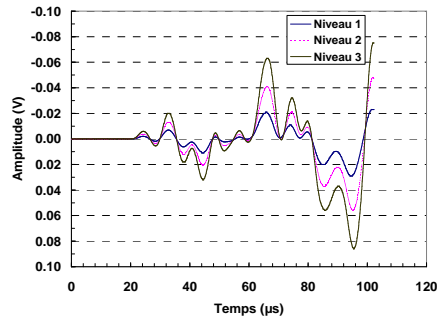
(grès : poids volumique : $\gamma = 26,1 \text{ kN/m}^3$; porosité totale : $n = 17,5 \%$; résistance mécanique à la compression : $\sigma = 38 \text{ MPa}$)



b) Signaux de référence au début de l'essai (point a).



c) Avant le seuil de stabilité : la proportionnalité reste apparente (point h).



d) Au-dessus du seuil de stabilité : les signaux ont été très perturbés (point n).

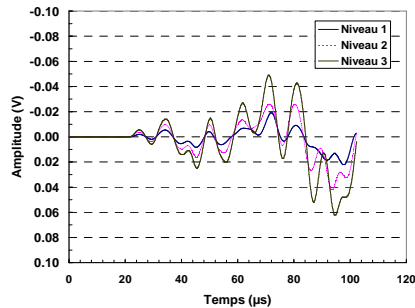


FIG. 2 – Evolution des réponses temporelles du spécimen de grès sous compression simple (excitation à 3 niveaux proportionnels).

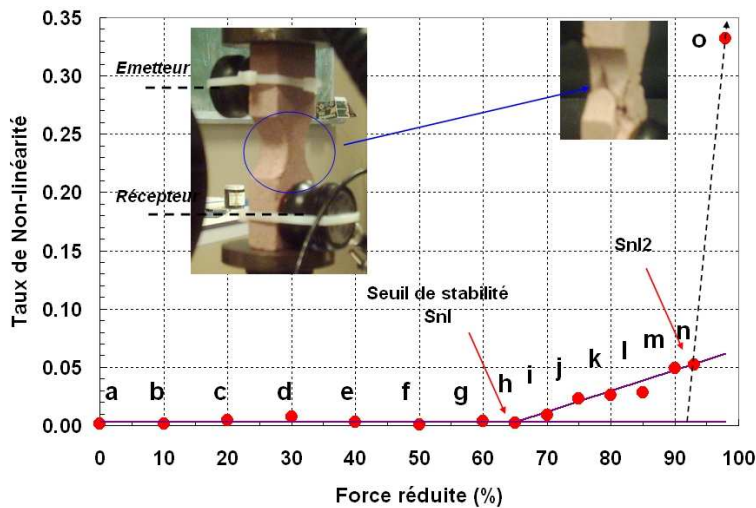


FIG. 3 – Taux de non-linéarité d'un grès sous compression simple.

Afin de comparer cette technique avec la méthode d'EA, nous avons réalisé quelques essais complémentaires sur les échantillons en mesurant l'EA et les ondes ultrasonores simultanément. La figure 4 présente respectivement le nombre de coups d'évènements, la fréquence moyenne, l'amplitude et l'énergie associée à chaque évènement localisé entre les capteurs d'EA dans la partie centrale de l'échantillon en fonction de la force réduite au cours des différentes phases du comportement mécanique avant la rupture.

Dans le premier stade, nous ne voyons qu'une activité acoustique ayant une faible énergie et un faible amplitude. Ce stade correspond à un niveau de force jusqu'à 50-60% de la force maximale. Dans le deuxième stade, l'activité acoustique commence faiblement, puis elle augmente au fur et à mesure de

l'augmentation du chargement. Le troisième stade se distingue à partir de 80-90 % de la force maximale jusqu'à la rupture lorsque l'activité acoustique augmente nettement. L'énergie des événements d'EA devient importante dans ce stade. Il faut néanmoins préciser que la distinction et la détermination de ces différents stades n'est pas très facile, notamment celle de l'occurrence de la microfissuration.

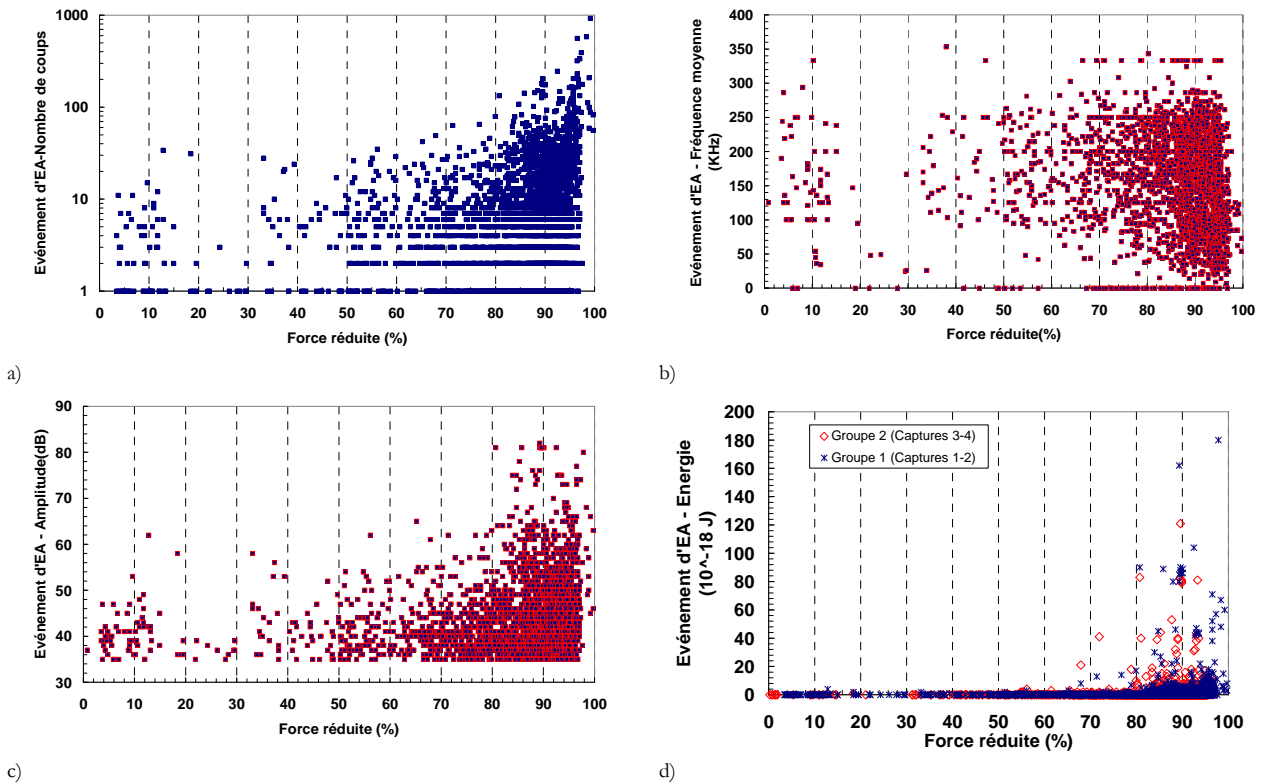


FIG. 4 – Événement localisées : a) nombre de coups, b) fréquence moyenne, c) amplitude et d) énergie.

L'utilisation d'un seul paramètre (tel l'amplitude, le nombre de coups, la fréquence, l'énergie) pour décrire les signaux d'émission acoustique est insuffisante pour la discrimination des modes d'endommagement, parce qu'elle est tributaire des conditions expérimentales (acquisition des signaux, matériau, distance entre capteurs). En effet, une analyse plus approfondie doit inclure d'autres paramètres tel que le temps de montée, la durée du signal, le nombre de coups et l'amplitude. Les diverses méthodes mathématiques permettent l'analyse statistique de données selon plusieurs paramètres afin de classer les événements d'EA en différentes familles. Les résultats de l'analyse statistique multivariée (k-moyenne algorithm) [11, 12] des données sont présentés sur la figure (5). Le graphe correspond à un rapport entre "le nombre de coups" et "la durée" en fonction du rapport entre "le temps de montée" et "l'amplitude maximale". La classe 1 est associée à des événements ou signaux de courte durée et forte amplitude (type A) tandis que la classe 2 est associée à des signaux de longue durée et faible amplitude (type B). On observe que la classe 1 contient plus d'événements que la classe 2. Ainsi, les événements de la classe 1 sont plus énergétiques (figure 5a). D'après les mesures de déformation, on remarque aussi que la plupart des événements de la classe 2 apparaissent plus tard, respectivement à partir de la phase de la propagation instable de la microfissuration (figure 5b). La figure montre que la distinction entre les deux classes est principalement liée au mécanisme d'endommagement, ce qui avait déjà été remarqué expérimentalement (figure 3). Il semble que les hautes valeurs d'amplitude (classe 1) correspondent à la fissuration et à l'écrasement des pores et les faibles valeurs (classe 2) à des phénomènes de frottement et de coalescence des microfissures.

La comparaison des résultats obtenus par ces deux méthodes a clairement confirmé la grande sensibilité de la propagation d'ondes ultrasonores, et que l'instabilité est plus nettement prévisible par la méthode proposée. De plus, la séparation des signaux d'EA à l'aide d'une analyse statistique multivariée a mis en évidence les divers mécanismes de fissuration entre les deux seuils caractéristiques (S_{n1} , S_{n12}) et au-delà du deuxième seuil (S_{n12}).

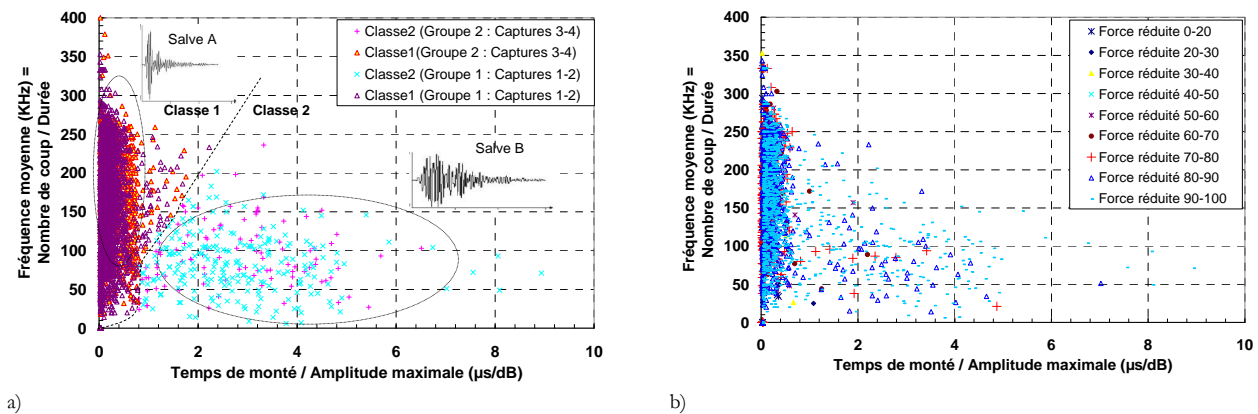


FIG. 5 – Classification des différents types de signaux d’EA selon nombre de coups/durée en fonction de temps de montée/amplitude maximale ; Classe 1 : 3748 évènements localisés, Classe 2 : 384 évènements localisés.

4 Conclusion

Cette communication vise à montrer que la manifestation très sensible de l’instabilité matérielle sur les caractéristiques de propagation d’ondes ultrasonores pourrait fournir une alarme précoce, très utile pour définir le domaine de stabilité du matériau fragile. Une évaluation non destructive de l’instabilité matérielle pourrait offrir un outil efficace de surveillance devant le risque de rupture brutale. Cette analyse peut être utilisée pour évaluer et contrôler quantitativement les processus de fissuration et d’endommagement des matériaux de façon non destructive et continue par un paramètre adimensionnel. L’application des techniques ultrasonores à l’inspection et à la surveillance des structures géotechniques est basée sur le fait que lors du processus de micro-fissuration, le matériau peut être localement instable et par suite modifier et/ou obstruer partiellement les caractéristiques de propagation des ondes.

References

- [1] Bui J.D., Fracture mechanics, Springer, 2006.
- [2] Mandel J., Conditions de stabilité et postulat de Drucker, Rheology and Soil Mechanics, IUTM Symp., Grenoble, ed. by J. Kravtchenko and P.M. Sirieys, Spring-Verlag, Berlin, Germany, 58-68, 1964.
- [3] Desrues J., Experimental characterization of failure, degradation and instability in geomaterials, Progressive deformation and failure observed in laboratory specimens using strain field measurement methods, Revue Européenne de Génie Civil, 8(5-6), 563-592, 2004.
- [4] Eberhardt E., Stead D., Stimpson B. and Read R.S., Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock, Can. Geotech. J., 35(2), 222-233, 1998.
- [5] Luong M.P., Infrared thermographic observations of rock failure. Comprehensive Rock Engineering - Principles, Practices & Projects, ed. by J. A. Hudson, Pergamon Press, 4(26), 715-730, 1992.
- [6] Lockner D.A., Walsh J.B. and Byerlee J.D., Changes in seismic velocity and attenuation during deformation of granite, J. Geophys. Res, 82, 5374-5378, 1977.
- [7] Cornet F.H., Bérard Th. and Bourouis S., How close to failure is a granite rock mass at a 5km depth?, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci., 44(1), 47-66, 2007.
- [8] Achenbach J.D., From ultrasonics to failure prevention. Elastic waves and ultrasonic non-destructive evaluation, ed. by S.K. Datta et al., North-Holland, Amsterdam, 1990.
- [9] Bendat J.S., Nonlinear system analysis and identification from random data, John Wiley & Sons, 1990.
- [10] Emami-Tabrizi M., Luong M.P. and Halphen B., A new experimental technique for detecting the onset of local instability, NDRM’2009, 3rd International Conference on New Development in Engineering, ed. by Y. Lin, Liberty Culture & Technology Company, USA, 2009.
- [11] MacQueen J., Some methods for classification and analysis of multivariate observations, Proc. 5th Berkeley Symp. on Mathematical Statistics Probability, University of California Press, p. 281-297, 1967.
- [12] Jain A.K., Duin R.P.W. and Mao J., Statistical pattern recognition: a review, IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2000.