

Étude en laboratoire par méthodes acoustiques de l'endommagement des roches de craie et corrélation avec des résultats *in situ*

G. SENFAUTE
D. AMITRANO
F. LENHARD
J. MOREL

INERIS et LAEGO
École des mines
Parc de Saurupt
54042 Nancy
senfaute@
mines.inpl-nancy.fr
amitrano@
mines.inpl-nancy.fr

Résumé

Les falaises crayeuses qui forment une proportion non négligeable du littoral européen sont le siège d'importants éboulements rocheux. Une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine de ces éboulements est fondamentale pour le développement d'une méthodologie basée sur l'écoute microsismique comme moyen de détection des signes précurseurs des grands éboulements de fronts rocheux. Pour mieux comprendre ces mécanismes, une étude de l'endommagement des roches de craie par méthodes acoustiques est effectuée en laboratoire et corrélée avec des résultats *in situ*. L'étude de l'évolution de l'énergie sismique libérée a montré qu'une augmentation significative de l'énergie sismique des événements prédit la rupture de l'échantillon en laboratoire et l'éboulement sur site. L'étude de l'évolution fréquentielle de signaux a montré, aussi bien en laboratoire que sur le site, que l'initiation de la rupture se caractérisait par un décalage du spectre des signaux vers les hautes fréquences.

Mots clés : émission acoustique, éboulement, falaise, craie, auscultation microsismique.

Laboratory study of chalk rocks damaging by acoustic methods and correlation with *in situ* results

Abstract

The chalky cliffs, which form a considerable proportion of the European coastline, are subject to significant collapses. A better understanding of the mechanisms leading to these collapses is fundamental to develop a methodology based on microseismic monitoring technique to predict cliffs collapses. For better understanding these mechanisms, an experimental study on chalk rocks damaging by acoustic emission methods is carried out in laboratory and is correlated with *in situ* results. The study of seismic energy released showed that a significant increase of seismic energy events predicts the rupture of the samples in laboratory and the rock collapse on site. The frequency spectrum analysis of the signals, in both laboratory and the site, showed that the start of the rupture is characterized by a progressive shift of the signals spectrum towards the high frequencies.

Key words : acoustic emission, collapse, microseismic monitoring, cliff, chalk.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} septembre 2005.

Introduction

A l'échelle de l'échantillon de laboratoire, la sollicitation mécanique de la roche engendre l'apparition et la propagation de fissures. Ce phénomène de microfissuration peut être observé par le biais de l'émission acoustique qu'il engendre (Lockner, 1993). La croissance et l'interaction de fissures à petite échelle conduisent au développement de fractures macroscopiques et ainsi à la ruine de l'échantillon. L'observation de l'émission acoustique, en laboratoire, au cours d'une sollicitation mécanique constitue une source d'information importante pour l'étude et la compréhension des processus de rupture dans les roches. Elle constitue ainsi un moyen d'observation de l'évolution de l'endommagement depuis le stade où elle est répartie de façon diffuse dans le matériau jusqu'à celui où elle se localise le long d'une discontinuité macroscopique pour aboutir à la rupture de l'échantillon (Lockner et Byerlee, 1991; Amitrano, 2003). L'étude de l'émission acoustique constitue donc une approche d'analyse et de compréhension de l'endommagement, dans l'optique de l'étude de la sismicité à plus grande échelle.

L'objectif de la recherche présentée est d'étudier, en laboratoire, l'endommagement d'échantillons de craie par des méthodes acoustiques et de comparer les résultats avec ceux des expérimentations *in situ* effectuées sur le site de Mesnil-Val, en Haute-Normandie. Les données expérimentales, issues de cette recherche, visent ainsi à mieux comprendre les mécanismes complexes à l'origine des éboulements de fronts rocheux crayeux qui constituent un danger direct pour l'homme et les habitations du littoral.

Pour répondre à l'inquiétude croissante des autorités face aux difficultés de sécurité civile et d'aménagement du territoire, générées par ces problèmes d'éboulements des falaises, un programme de recherche européen PROTECT⁽¹⁾ (PRediction Of The Erosion of Cliffed Terrains) a été mis en œuvre. C'est dans ce cadre que la technique d'écoute microsismique a été appliquée sur le site expérimental (Senfaute *et al.*, 2003; Busby *et al.*, 2002). Un réseau microsismique constitué de cinq stations de

(1) PROTECT regroupe les partenaires suivants: Geological Survey of Denmark and Greenland, British Geological Survey, Brighon University, BRGM, INERIS.

mesure sismiques a été installé sur un front de falaise, sous surveillance permanente depuis janvier 2002. Une série d'échantillons sur site a été prélevée et a fait l'objet d'essais mécaniques en laboratoire avec mesures d'émission acoustique. Pour la réalisation de ces essais, une procédure spécifique permettant de coupler les mesures mécaniques et acoustiques a été développée.

Caractéristiques et comportement mécanique de la craie

Les craies ont un comportement mécanique très particulier, intermédiaire entre celui d'une roche et celui d'un sol. Le tableau I synthétise quelques caractéristiques mécaniques et physiques de la craie susceptibles de nous aider dans l'analyse et l'interprétation des essais effectués dans cette recherche.

Des études montrent que la craie sèche se comporte comme un solide élastique fragile, possédant une légère viscosité, sa rupture se produisant sans déformation permanente au terme d'une phase quasi linéaire de la courbe contrainte-déformation (Doremus, 1978). La rupture est explosive et se fait très souvent en colonnettes parallèles à l'axe de chargement. L'eau affecte le comportement du matériau avant et après rupture. En effet, pour un matériau saturé, la relation contrainte-déformation est beaucoup moins linéaire. Pour une même sollicitation, la craie saturée se déforme davantage que la craie sèche. Au cours de la phase précédant la rupture, on observe une augmentation de l'effet de viscosité qui se traduit par une hystérésis des courbes de charges-décharge plus prononcée (Schwartzmann, 1989). De plus, la fragilité de la rupture est fortement atténuée par la saturation en eau. Après l'apparition de la rupture, l'essentiel de la déformation a lieu par glissement sur un plan incliné. Le comportement de la craie sèche serait celui d'un solide élastique fragile avec une faible tendance à la viscosité. Néanmoins, pour des états de contrainte élevés, à composante volumique relativement importante par rapport à la part déviatorique, un comportement élasto (visco)-plastique est observé. Le comportement de la craie saturée est celui d'un solide visco-élastique. Des

TABLEAU I

Synthèse bibliographique sur les caractéristiques mécaniques de la craie (De Pomerai, 1999; Couvreur *et al.*, 1995; Pecqueur *et al.*, 1995; Henry, 1989; Schwartzmann *et al.*, 1989; Monjoie et Schroeder, 1989; Dorémus, 1978).

| | | |
|---|-------------------------|---------------------------------|
| Porosité (%) | | $20 < \phi < 45$ |
| Teneur en eau à saturation (%) | | $12 < w < 28$ |
| Masse volumique (kg/m^3) | | $1440 < d < 2050$ |
| Vitesse de propagation des ondes P (m/s) | | $1900 < V_p < 2800$ |
| Vitesse de propagation des ondes S (m/s) | Craie sèche et calcaire | 1470 |
| Résistance à la compression uniaxiale (MPa) | Craie sèche | $1,5 < \sigma_r < 50$ |
| | Craie saturée | $0,4 < \sigma_r < 9$ |
| Module d'Young statique (MPa) | Craie sèche | $3000 < E_{\text{sec}} < 16000$ |
| | Craie saturée | $740 < E_{\text{sat}} < 4500$ |
| Module d'Young dynamique (MPa) | Craie sèche et calcaire | 10700 |
| Coefficient de Poisson | | $0,13 < \nu < 0,25$ |
| Coefficient de Poisson dynamique | Craie sèche et calcaire | $\nu = 0,30$ |

études plus récentes ont cependant mis en évidence que la craie présente un comportement plastique sous contrainte isotrope et, même, sous des contraintes non isotropes. Cela se traduit par un phénomène d'écrasement des pores, bien connu des pétroliers, impliquant des affaissements importants des plates-formes en mer du Nord (Maury, 1987).

3

Description et conduite des essais en laboratoire

3.1

Site expérimental et prélèvement des échantillons

Le site d'étude se situe en Haute-Normandie, dans la localité de Mesnil-Val. Ce site est constitué d'une falaise crayeuse de 50 mètres de haut, soumise à une forte érosion, et qui subit un recul moyen d'environ 0,5 à 1 mètre par an. Sur le front de la falaise, deux séries lithologiques principales sont observées: un banc du Turonien, situé en pied de falaise, constitué d'une craie massive à passées noduleuses, d'une épaisseur d'environ 10 mètres et un banc de craie épais du Coniacien (Sénonien inférieur), moins consolidé, fortement diaclasé et parcouru par de minces lits de silex subhorizontaux, l'épaisseur est d'environ 40 mètres. L'interface entre ces deux horizons est constituée par une couche marneuse épaisse de 20 cm environ (Fig. 1).

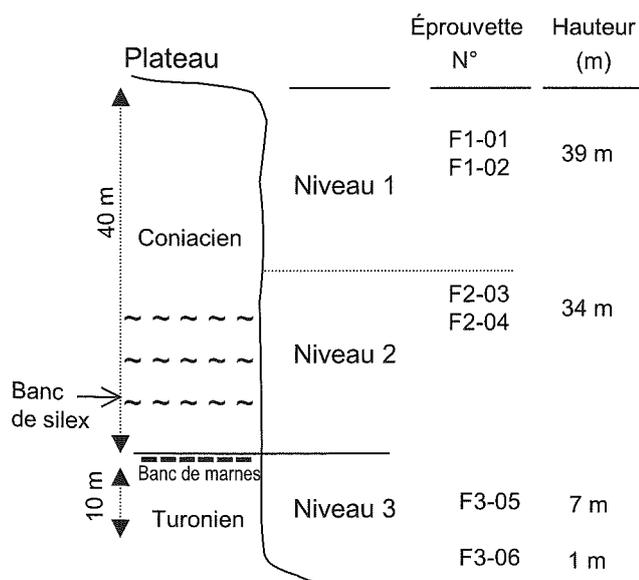


FIG. 1 Série lithologique simplifiée du front de la falaise avec la localisation des échantillons prélevés aux différents niveaux de la falaise.

Le relevé géologique réalisé au front de la falaise a montré, en partant du haut de la falaise, trois niveaux géologiques: les niveaux 1 et 2 (dans le Coniacien) avec le niveau 1, plus superficiel et plus fracturé que le niveau 2. Le niveau 3, situé sous le banc de marne, correspondant au Turonien et à la portion de falaise soumise directement à l'action des vagues. Ces trois niveaux ont aussi été identifiés par des mesures de vitesse de propagation des ondes sismiques qui ont montré des différences significatives entre les trois niveaux précédemment identifiés. Pour obtenir une bonne représentation du massif de craie constituant le front de la falaise, 8 blocs ont été prélevés sur les trois niveaux identifiés (Fig. 1). Sur le front de la falaise, les blocs ont été découpés en rappel et à la tronçonneuse comme le montre la figure 2. Ils ont été orientés de manière à réaliser les éprouvettes perpendiculairement à la stratification. A partir de 8 blocs prélevés sur le front de la falaise, 6 carottes (deux carottes par niveau) ont été extraites et ont fait l'objet de cette étude.

3.2

Réalisation des essais mécaniques et acoustiques

Les essais ont été effectués en compression uniaxiale. Un réseau de 8 capteurs acoustiques a été placé autour de l'échantillon (Fig. 3). Les capteurs utilisés sont de type piézoélectrique (transducteurs électromécaniques en céramique) avec une bande passante entre 100 et 900 kHz. La fréquence d'échantillonnage des signaux acoustique est de 10 MHz. L'amplification des signaux est de 40 dB. Le système scrute en permanence l'activité acoustique transmise par les capteurs. Lorsqu'un seuil fixé (seuil de déclenchement) est dépassé sur l'une des 8 voies du système, le signal est enregistré de manière synchrone sur l'ensemble des voies pour une durée de 409,6 μ s. Le système d'acquisition d'émission acoustique a été couplé au système d'acquisition de mesures mécaniques permettant d'enregistrer la contrainte appliquée, le déplacement relatif des plateaux et les déformations de l'éprouvette. Initialement, l'équipement des éprouvettes devait être constitué des jauges d'extensométrie. La forte porosité du matériau n'a pas permis d'équiper les carottes de manière satisfaisante (mauvaise tenue de la résine, effritement du matériau). La solution retenue a été d'équiper les éprouvettes avec des extensomètres en remplacement des jauges. Le matériel utilisé a été constitué d'une chaîne centrale permettant de mesurer les déformations latérales, et d'un système de mesure de la déformation axiale. Cette solution permet d'obtenir des mesures de déformation faibles mais ne permet pas de maintenir constant l'état hydrique du matériau au cours de l'essai. Par ailleurs, le collage des capteurs acoustiques nécessitait un matériau peu humide et la durée de mise en place des capteurs a conduit à une dessiccation quasi complète des éprouvettes. En fin d'essai, une détermination de la teneur en eau est réalisée sur les restes de chaque éprouvette, cette teneur en eau est considérée comme la teneur en eau de l'essai. Des très faibles valeurs de teneur en eau ont été obtenues pour les éprouvettes dans les deux niveaux supérieurs (Coniacien). Cependant, pour les deux éprouvettes prélevées dans la partie inférieure (Turonien) la teneur en eau en fin d'essai est non négligeable (voir Tableau II).

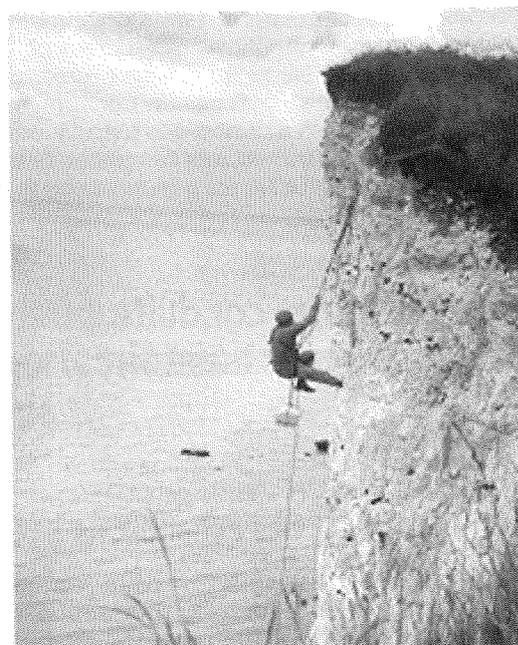


FIG. 2 Prélèvement des blocs de craie au front de la falaise de Mesnil-Val.

TABLEAU II Paramètres mécaniques des échantillons étudiés.

| Paramètres | Échantillon | | | | | |
|--|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | F1-01 | F1-02 | F2-03 | F2-04 | F3-05 | F3-06 |
| Porosité totale par faciès (%) | 45,2 | | 45,4 | | 42,4 | |
| Teneur en eau initiale (%) | 24 | 24 | 22 | 22 | 16 | 28 |
| Teneur en eau en fin d'essai (%) | 0,43 | 0,89 | 0,16 | 0,30 | 7,13 | 2,45 |
| Masse volumique à sèche (kg/m ³) | 1 510 | 1 510 | 1 530 | 1 550 | 1 710 | 1 540 |
| Vitesse de propagation des ondes P (m/s) | 2 047 | 2 050 | 2 032 | 2 099 | 2 438 | 2 587 |
| Vitesse de propagation des ondes S (m/s) | 1 160 | 1 146 | 1 126 | 1 161 | 1 001 | 1 165 |
| Résistance en compression simple (MPa) | 5 | 4 | 5,3 | 5,1 | 3,5 | 4,2 |
| Module d'Young statique (MPa) | 7 400 | 4 400 | 6 200 | 6 000 | 8 400 | 5 400 |
| Coefficient de Poisson | 0,25 | 0,15 | 0,18 | 0,19 | - | 0,20 |

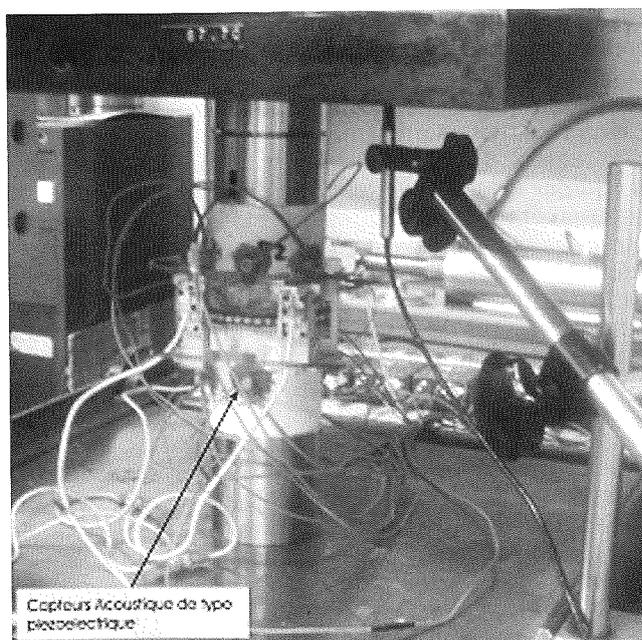


FIG. 3 Configuration des capteurs acoustiques autour de l'échantillon.

Les essais ont été réalisés sur une presse hydraulique asservie à vitesse de déformation constante ($5.10^{-6}.S^{-1}$) et des cycles de chargement-déchargement sont effectués à différents niveaux de contrainte. Des essais préliminaires ont fourni une estimation de la contrainte de pic et donc permis de programmer le système hydraulique pour obtenir une bonne répartition des cycles de chargement-déchargement sur l'ensemble de l'essai.

4

Résultats des essais en laboratoire

4.1

Comportement mécanique de la craie étudiée

Le tableau II présente les caractéristiques mécaniques mesurées pour chaque échantillon. Les contraintes à la rupture moyennes pour chaque niveau de craie prélevé au front de la falaise sont les suivantes :

- niveau 1 (sommet de la falaise) : 4,5 MPa ;

- niveau 2 (zone intermédiaire) : 5,2 MPa ;
- niveau 3 (partie basse de la falaise) : entre 3,5 et 4,2 MPa.

Les deux niveaux supérieurs (Coniacien) ne présentent pas de différences significatives des valeurs de contrainte de rupture. Le niveau inférieur (Turonien), malgré une porosité plus faible, présente une résistance en compression similaire, voire inférieure, à celle des niveaux supérieurs. Ceci pourrait s'expliquer par la présence d'une teneur en eau non négligeable en fin d'essai (voir Tableau II). L'ensemble des valeurs de résistance en compression se trouve clairement parmi les plus petites valeurs données dans la littérature ($1,5 < \sigma_r > 50$ MPa) pour des essais similaires sur de la craie sèche.

Le bloc prélevé au pied de la falaise (1 mètre de hauteur) présente une teneur en eau, avant essai, supérieure à celle des blocs prélevés au-dessus. La teneur en eau de ce bloc est de 28 %. Elle est équivalente à la teneur en eau à saturation maximale trouvée dans la littérature. Le bloc situé au pied de falaise est atteint par la mer lors de la marée haute et probablement maintenu dans un état de saturation totale par l'infiltration de l'eau de mer.

Pour l'ensemble des essais, la phase pré-pic est quasiment linéaire, très marquée, avec une déformation inélastique faible avant la première rupture. Le comportement post-pic se caractérise par plusieurs chutes de contrainte séparées par des paliers et, pour la plupart des éprouvettes, une importante phase de post-pic est observée, avec radoucissement sur une amplitude de déformation importante.

4.2

Caractéristiques des enregistrements acoustiques

Deux types d'enregistrements acoustiques sont effectués lors des essais en laboratoire : les enregistrements synchronisés de l'ensemble des traces sismiques lorsque deux capteurs au minimum ont dépassé un seuil de déclenchement établi (Fig. 4) et le nombre de coups d'émission acoustique qui correspond au nombre de fois où le seuil est dépassé (il n'y a pas d'enregistrement des traces sismiques). Ce dernier paramètre est un bon estimateur statistique de l'activité acoustique (Lockner, 1993). Le tableau III présente le nombre total d'événements enregistrés et le nombre de coups acoustiques enregistrés pour chaque essai.

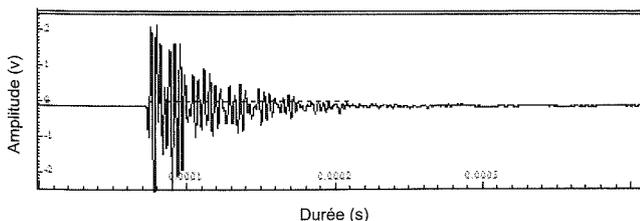


FIG. 4 Exemple d'une trace sismique enregistrée lors d'un essai.

TABLEAU III Nombre d'événements microsismiques et de coups acoustiques enregistrés lors de chaque essai.

| Éprouvette | Nombre d'événements | Nombre de coups |
|------------|---------------------|-----------------|
| F1-01 | 300 | 3 000 |
| F1-02 | 460 | 3 450 |
| F2-03 | 320 | 2 800 |
| F2-04 | 255 | 1 900 |
| F3-05 | 175 | 1 400 |
| F3-06 | 110 | 1 500 |

4.3

Évolution de l'émission acoustique au cours de la déformation

Nous analysons le nombre de coups total d'émission acoustique compté sur la totalité des capteurs. L'étude de l'évolution du nombre de coups total cumulé au cours de la déformation a été effectuée pour l'ensemble des éprouvettes. Ceci a permis d'identifier pour chacune des éprouvettes étudiées les différentes phases de la déformation de l'échantillon. La figure 5 présente deux exemples de l'évolution du nombre de coups cumulé d'émission acoustique et du comportement mécanique associé. Les phases observées sont les suivantes :

- une phase de fermeture de pores et des microfissures préexistantes où l'activité acoustique est quasi nulle ;
- une phase linéaire importante qui se prolonge presque jusqu'au pic de contrainte avec une activité acoustique très faible. Au cours des cycles de déchargement-rechargement, on observe un comportement linéaire et réversible avec une faible hystérésis et une absence d'activité acoustique révélant un comportement élastique ;
- une phase non linéaire courte au début de laquelle l'activité acoustique augmente nettement. Cette phase de la déformation est clairement mise en évidence par l'augmentation significative de l'activité acoustique (point A, Fig. 5). Dans le cas des craies étudiées, cette phase débute assez tardivement, puisque le point A se situe entre 76 et 90 % de la résistance à la compression uniaxiale ;
- une phase post-pic durant laquelle plusieurs chutes de contrainte accompagnées des pics avec une émission acoustique significative se produisent (point B, figure 5). Après ces pics, l'activité acoustique continue à être importante, elle serait associée à des cisaillements survenus pendant cette phase de post-pic.

Pour quantifier l'énergie des événements enregistrés au cours des essais, la méthode utilisée a consisté à effectuer la somme des amplitudes du signal au carré multipliée par la période d'échantillonnage ($E = \sum A^2 \Delta t$). La quantité obtenue ne correspond pas physiquement à une énergie, néanmoins elle est représentative de la taille des événements (Lockner, 1993). La figure 6 illustre un exemple de corrélation entre l'énergie libérée par événement, l'énergie totale cumulée et la déformation de l'éprouvette.

Nous avons étudié, pour chaque essai, le point correspondant à l'instant à partir duquel un décro-

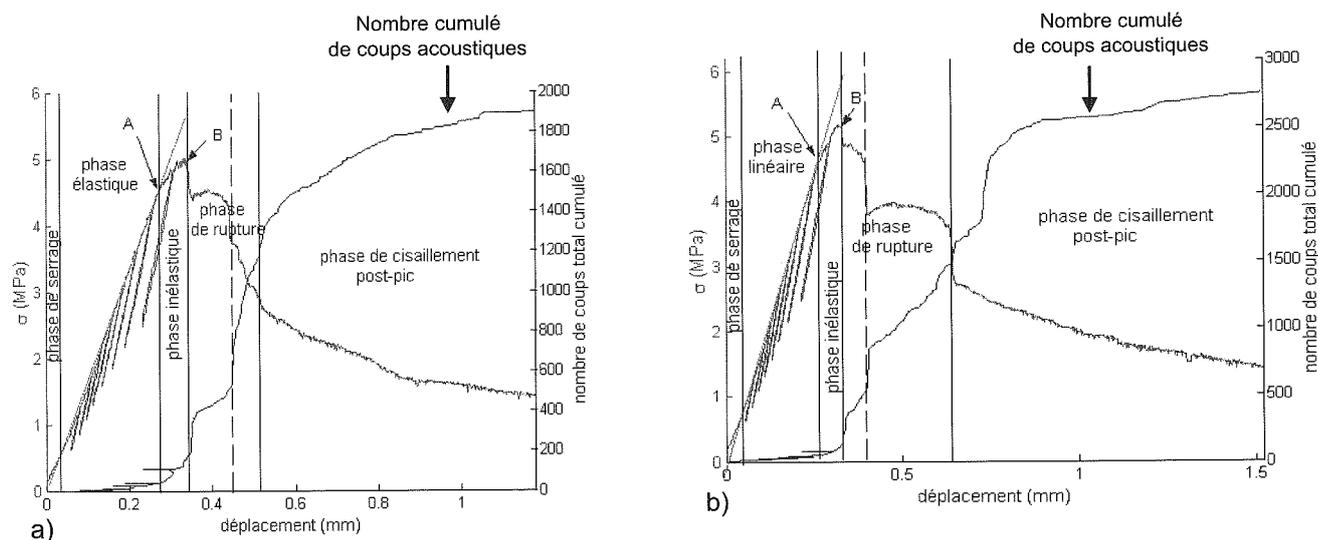


FIG. 5 Évolution du nombre de coups cumulés d'émission acoustique au cours de la déformation de deux essais de craies.

chement important de la courbe d'énergie sismique cumulée a été détecté. Ce point a été appelé point C (cf. Fig. 6b). Le tableau IV présente le rapport, en pourcentage, entre la contrainte déterminée au point C (σ_c) et la contrainte de rupture (σ_{max}). Les résultats montrent que les événements présentant une énergie significative et générant un décrochement de la courbe d'énergie cumulée apparaissent entre 84 et 99 % de la contrainte maximale. Cela signifie que les

événements importants commencent à apparaître dans la zone inélastique et très proche de la contrainte maximale. Cependant, les événements les plus forts ne sont pas forcément dans ces zones, ils apparaissent, pour la plupart, dans la phase post-pic (Fig. 6a).

TABLEAU IV Position du point C (cf. Fig. 6b) par rapport à la contrainte de rupture déterminée pour chaque essai.

| Éprouvette | σ_c/σ_{max} (%) |
|------------|-----------------------------|
| F1-01 | 84 |
| F1-02 | 91 |
| F2-03 | 98 |
| F2-04 | 93 |
| F3-05 | 99 |
| F3-06 | 97 |

5 Lien entre la rupture en laboratoire et l'éboulement rocheux sur site

5.1 Enregistrement d'un éboulement sur site

Le front de falaise de craie du site expérimental de Mesnil-Val a été instrumenté depuis janvier 2002 par un réseau de capteurs microsismiques de type géophone et accéléromètre. Le 23 juin 2002, un éboulement d'une ampleur importante a affecté le centre de la zone

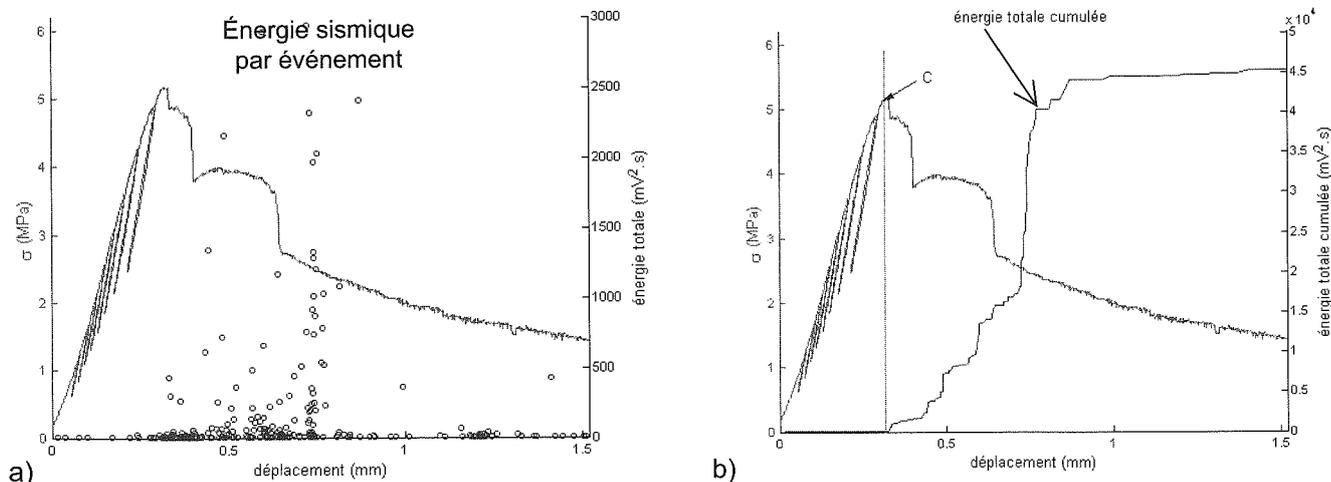


FIG. 6 Corrélation entre l'énergie par événement (a), l'énergie cumulée (b) et la déformation de l'éprouvette.

instrumentée avec un volume de roche éboulé d'environ 2 000 m³. Des événements microsismiques associés aux ruptures avant et pendant l'éboulement ont été enregistrés par le réseau de capteurs. La figure 7 illustre la position des capteurs de surveillance microsismique sur le front de falaise et l'éboulement ayant affecté le site. Les détails de l'instrumentation microsismique *in situ* peuvent être consultés dans Senfaute *et al.*, 2003.

5.2

Comparaison entre l'activité microsismique enregistrée en laboratoire et sur site

La comparaison entre les données enregistrées sur site et en laboratoire est très délicate, cela pour les raisons suivantes :

- le problème évident de transposition d'échelle. Du point de vue temporel, on passe d'une fenêtre d'observation de quelques dizaines de minutes en laboratoire à environ une journée pour l'effondrement sur site. Du point de vue spatial, on passe d'un échantillon de 12 cm de hauteur à un front de falaise de 50 m de hauteur ;
- en laboratoire, les essais ont été effectués en compression uniaxiale avec une vitesse de déformation imposée constante. Les observations de terrains et les premières modélisations suggèrent que la falaise s'effondre en plusieurs phases et probablement sous son propre poids.

Cependant, les analyses des données acoustiques ont montré de remarquables similitudes entre les phénomènes de ruptures observés à l'échelle du laboratoire et celles du site. La comparaison des résultats de ces deux échelles a été effectuée à partir de deux paramètres : l'évolution de l'énergie sismique libérée et l'évolution fréquentielle des événements enregistrés entre le site et le laboratoire.

5.2.1

Évolution de l'énergie sismique libérée sur site et en laboratoire

L'analyse de l'évolution de l'énergie sismique libérée par événement à l'échelle du laboratoire et du site montre une remarquable similitude (Fig. 8). Les événements les plus énergétiques se produisent au moment de la rupture mais celle-ci est précédée d'une augmentation significative de l'énergie sismique cumulée. Cette augmentation de l'énergie sismique prédit l'initiation de la rupture de l'échantillon en laboratoire et de la rupture du massif sur site.

5.2.2

Évolution de la fréquence des événements au cours de la déformation en laboratoire et sur site

Le contenu fréquentiel des signaux sismiques est affecté par des phénomènes divers (propagation d'ondes, caractéristiques du matériau, type de rupture, matériel d'acquisition utilisé...), il n'est donc pas aisé de déterminer l'influence d'un ou de plusieurs paramètres sur l'évolution fréquentielle des signaux.

L'étude des événements dans le domaine fréquentiel concerne l'analyse des principaux pics en fréquence, leurs amplitudes respectives et l'effet du filtrage du matériau et du dispositif expérimental. Afin d'approcher au mieux le spectre du signal à la source, il est nécessaire de réaliser une déconvolution du signal. Cela peut se faire en divisant algébriquement le spectre du signal enregistré, par le spectre de la réponse impulsionnelle du système (fonction de transfert). L'intérêt de la déconvolution pour étudier les événements dans le domaine fréquentiel a été démontré par la comparaison de la distribution des fréquences centrales des signaux avant et après déconvolution (Amitrano *et al.*, 1996). Les signaux analysés dans cette étude n'ont pas

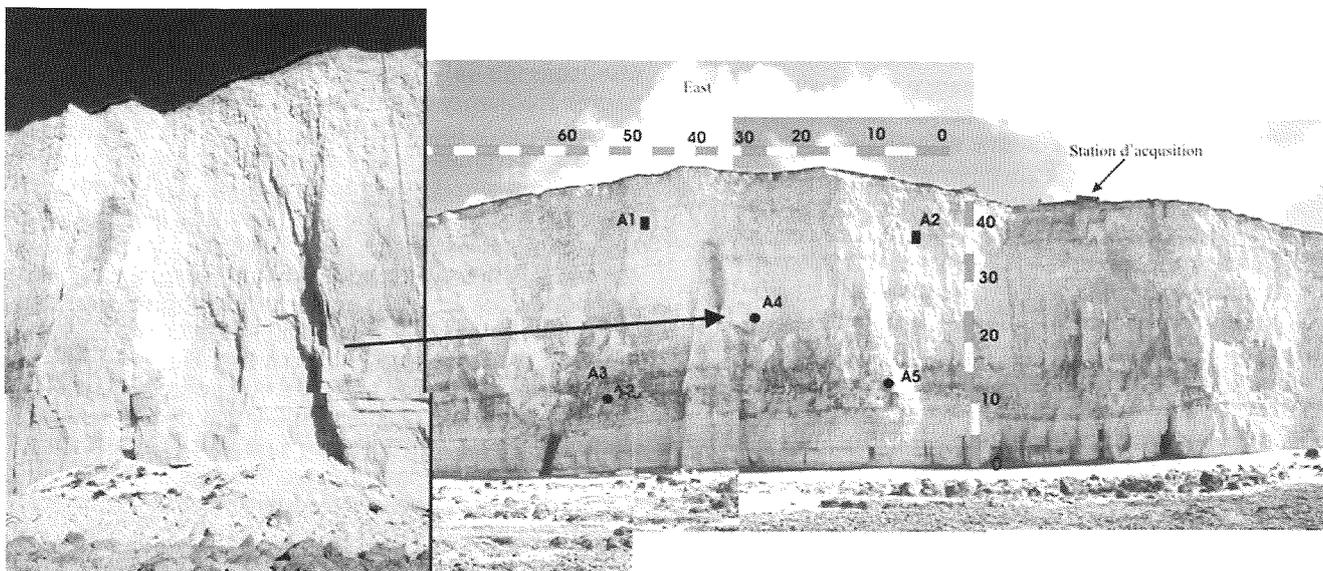


FIG. 7 Localisation du réseau de capteurs microsismiques installés au front de la falaise et illustration de l'éboulement apparu au centre de la zone instrumentée.

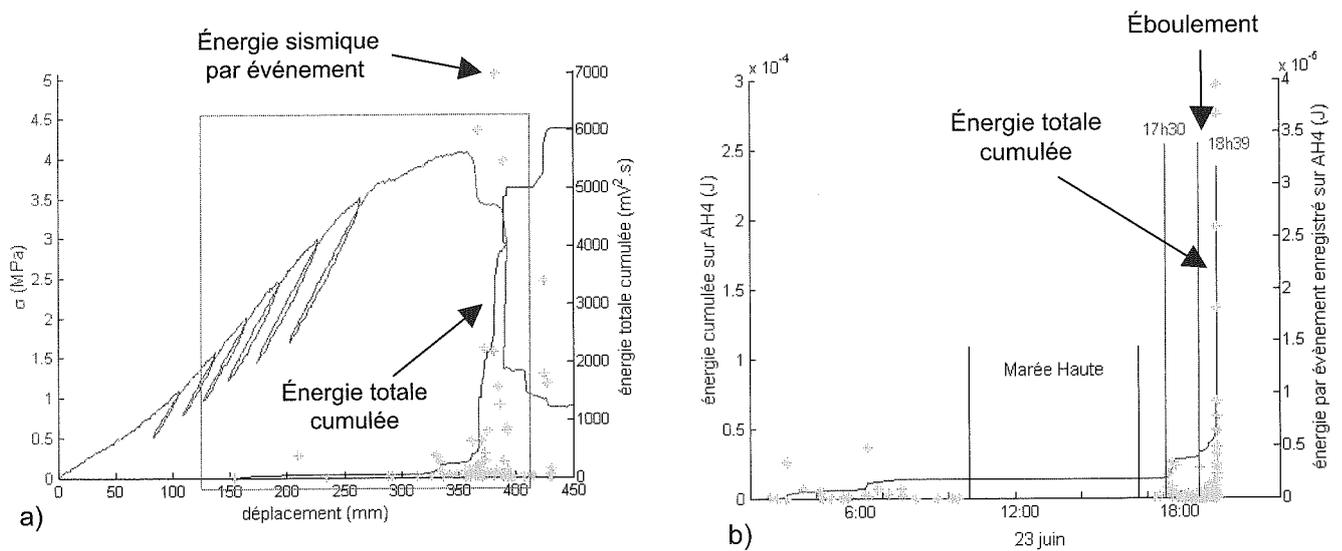


FIG. 8 Évolution de l'énergie sismique cumulée : (a) en laboratoire, (b) sur le site de Mesnil-Val.

fait l'objet d'une déconvolution et aucune loi d'atténuation n'a été utilisée. Ainsi, nous n'analysons pas les valeurs absolues des fréquences composant les signaux, nous étudions l'évolution relative du contenu fréquentiel des signaux au cours des essais. A titre indicatif, les fréquences maximales des signaux enregistrés en laboratoire vont entre 150 et 350 kHz et celles des signaux enregistrés sur site vont entre 2 et 6 kHz. Les fréquences maximales en laboratoire sont en moyenne 60 fois plus importantes que celles des signaux enregistrés sur site. Ce résultat est tout à fait normal car cette différence fréquentielle correspond à la taille des sources qui est très différente entre le site et le laboratoire.

Le paramètre sélectionné pour étudier l'évolution du contenu fréquentiel des signaux correspond à la fréquence calculée à 50 % de la puissance spectrale cumulée. L'évolution de ce paramètre a été étudiée à l'aide d'une fenêtre glissante, la fréquence à 50 % de la puissance spectrale cumulée de chaque événement a été moyennée sur 50 événements, et ce tous les 5 événements aussi bien pour les événements enregistrés lors des essais en laboratoire que pour ceux enregistrés sur site lors de l'éboulement. La figure 9 illustre l'évolution des fréquences centrales des signaux des événements enregistrés en laboratoire et ceux enregistrés sur site. Les résultats sur l'ensemble des essais effectués en laboratoire montrent que le contenu fréquentiel des événements se déplace progressivement vers les plus hautes fréquences pendant la phase linéaire jusqu'à la phase inélastique où les fréquences sont maximales. Dans cette phase, elles restent constantes et diminuent même légèrement. Un comportement similaire est observé sur le site, avant l'éboulement de la falaise, on observe une nette évolution du contenu fréquentiel des événements qui se déplace progressivement des basses fréquences vers les plus hautes fréquences. Ensuite, une baisse significative de la fréquence est observée.

6

Interprétation des résultats

Les résultats des essais d'émission acoustique effectués en laboratoire ont montré que les événements les plus significatifs commencent à apparaître dans la zone inélastique très proche de la rupture mais que celle-ci est précédée d'une augmentation significative de l'énergie sismique cumulée. Cette même évolution de l'énergie sismique a été observée sur site avant l'éboulement du 23 juin 2002 (cf. Fig. 8). Ces résultats montrent que dans le cas des roches de craie, l'augmentation significative de l'énergie sismique prédit l'initiation de la rupture de l'échantillon en laboratoire et de l'éboulement du massif rocheux sur site.

L'étude sur l'évolution fréquentielle des essais effectués en laboratoire a montré l'apparition de hautes fréquences avant la rupture (cf. Fig. 9a). Cette évolution vers les hautes fréquences avant la rupture est plus clairement observée sur les enregistrements à l'échelle du site. La figure 9b présente l'évolution fréquentielle des événements quelques heures avant l'éboulement. Deux pics de fréquence maximale sont observés, un pic une heure avant l'éboulement, que l'on peut associer à une phase de création de surfaces de rupture, puis un second pic au moment de l'éboulement de la falaise que l'on peut associer à une phase de glissement sur ces surfaces de rupture. Ce dernier pic est suivi d'une baisse significative de la fréquence. Cette baisse de la fréquence pourrait être associée à l'augmentation de la taille des sources sismiques qui générerait de plus basses fréquences et/ou à des zones très fracturées pouvant filtrer les hautes fréquences. Cette baisse significative de la fréquence après le pic de fréquence maximale a aussi été observée en laboratoire dans la phase post-rupture des échantillons. Ces résultats sont comparables à ceux de Ohnaka et

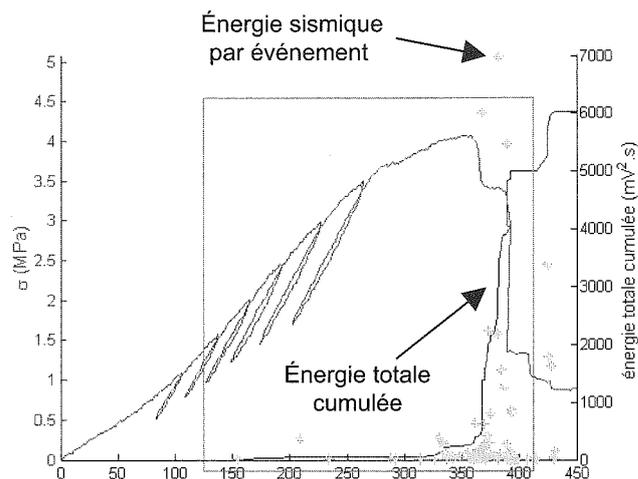
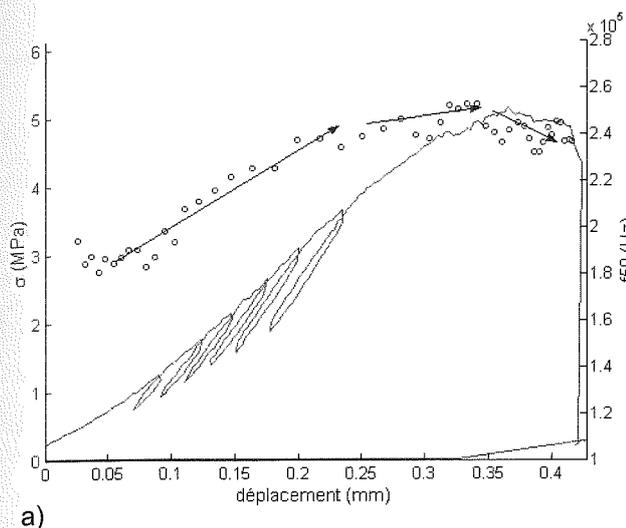


FIG. 9 Évolution de la fréquence centrale des signaux enregistrés : (a) en laboratoire (b) sur le site avant et pendant l'éboulement.

Mogi (1982) qui ont aussi montré une augmentation rapide de l'activité acoustique haute fréquence juste avant la rupture.

7

Conclusion

La méthode d'écoute microsismique a été appliquée à l'étude de l'endommagement des roches de craie aussi bien à l'échelle du laboratoire que du site. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence des similitudes entre les phénomènes de rupture observés en laboratoire et sur site, deux conclusions essentielles ressortent de cette recherche :

- une augmentation significative de l'énergie sismique cumulée est un bon indicateur de l'initiation de la rupture de l'échantillon en laboratoire et de l'éboulement du massif rocheux sur site ;
- l'évolution fréquentielle des signaux, paramètre fortement lié à la mécanique de la rupture, a montré clairement sur site, un décalage du spectre des signaux vers les hautes fréquences avant l'éboulement de la falaise. Cette évolution est aussi observée en laboratoire mais d'une manière moins significative que celle observée sur le site.

Dans le cadre du développement d'une méthodologie basée sur la technique d'écoute microsismique comme moyen de détection des signes précurseurs des éboulements de fronts rocheux instables, l'évolution de l'énergie sismique libérée est un indicateur particulièrement intéressant pour la prévision des risques d'éboulements du massif rocheux. Les résultats montrent que le décalage du spectre des signaux vers les hautes fréquences semble être aussi un paramètre intéressant pour la prévision d'un risque d'éboulement. Cependant, pour ce dernier paramètre, les résultats ne sont pas encore tout à fait concluants et des recherches devront être poursuivies.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la Communauté européenne pour le financement du projet européen PROTECT ayant permis l'instrumentation du site Mesnil-Val en Haute-Normandie et le BRGM (partenaire du projet PROTECT) pour l'aide financière apportée à la réalisation des essais en laboratoire. Nous remercions également le ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie pour l'aide financière apportée à la réalisation de cette recherche et particulièrement les partenaires du programme PROTECT (Christophe Gourry, Rory Mortimore, James Lawrence, Jonathan Busby, Andrew Thrower,) avec lesquels les discussions furent précieuses pour la réalisation de cette recherche. Enfin, nous remercions M. Soulay et M. Ghoreychi pour la relecture et les commentaires ayant permis d'apporter des améliorations significatives à cet article.

- Amitrano D. – Brittle-ductile transition and associated seismicity: experimental and numerical studies and relationship with the b-value. *Journal of Geophysical Research* 108, B1, 2044, doi:10.1029/2001JB000680, 2003.
- Amitrano D., Hantz D., Orenge Y. – Émission acoustique d'une roche fracturée. 11^e Colloque franco-polonais en mécanique des sols et des roches appliquée. Gdansk, Pologne, 1996, p. 220-223.
- Busby J.-P., Gourry J.-C., Senfaute G., Pedersen S., Mortimore R. – Can we predict coastal cliff failure with remote, indirect measurements. *Instability, planning and management*, R. McInnis & J. Jakeways Eds, London, Thomas Telford, 2002, p. 203-208.
- Couvreur J.-F., Thimus J.-F. – Cracking process of rocks in lab tests predicted by correlation with ultrasonics, acoustic emission and computed tomography. *International Symposium on non-destructive testing in civil engineering*, Schikert & Wiggenhauser Eds, Berlin, DGZfPn, 1995, p. 779-786.
- De Pomerai M.R. – Hazards associated with Cliff Collapse in the Chalk between Eastbourne and Brighton, Sussex, UK. Geohazard assessment MSc, University of Portsmouth, School of Earth, Environmental and Physical Sciences, 1999.
- Doremus C. – *Les craies du Nord de la France, corrélation entre la lithostratigraphie, la microstructure et les propriétés mécaniques*. Thèse, université de Lille, 1978.
- Henry J.-P. – La craie: comportement mécanique, originalité et conséquence. *Journée de la craie*, Lille, 1989, p. 1-19.
- Lockner D.A. – The Role of Acoustic emission in the Study of Rock Fracture. *In Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* 30, 1993, p. 883-899. Abstr.
- Lockner, D.A., and Byerlee J.D. – Precursory AE patterns leading to rock fracture. *Vth Conf. AE/MS Geol. Str. and Mat.* Hardy ed., Trans Tech Publication, Clausthal-Zellerfeld, Germany, The Pennsylvania State University, 1991, p. 45-58.
- Maury V. – Geomechanical approach of oil and gas production. Main problems, first results. *4th International Congress of Rock Mechanics*, Montréal, Canada, 1987.
- Monjoie A., Schroeder C. – Caractéristiques mécaniques de craies du Crétacé supérieur. *Journée de la craie*, Lille, 1989, p. 93-125.
- Ohnaka M., Mogi K. – Frequency Characteristics of Acoustic Emission in Rocks under Uniaxial Compression and Its Relation to the Fracturing Process to Failure. *Journal of Geophysical Research* 87, n° B5, 1982, p. 3873-3884.
- Pecqueur G., Mikolajczak A., Siwak J.-M. – Étude expérimentale de deux craies en torsion. Colloquium Mundanum Craies et Schistes, GBMR/BVRM, 20-22 mars 1995, Bruxelles, p. 44-52.
- Schwartzmann R., Bivert B., Delporte R. – Comportement des cavités souterraines dans la craie. *Journée de la craie*, Lille, 1989, p. 39-52.
- Senfaute G., Merrien-Soukatchoff V., Morel J. – Microseismic monitoring applied to prediction of chalk cliffs collapses and contribution of numerical modeling. *International Conferences on Fast Slope Movements. Prediction and Prevention for Risk Mitigation*. Luciano Picarelli (ed.), 11th-13th May 2003, Naples, Italy, 2003, p. 463-468.