

Auscultation microsismique appliquée à la détection des éboulements des falaises crayeuses

Gloria Senfaute, Jean-Christophe Gourry

▶ **To cite this version:**

Gloria Senfaute, Jean-Christophe Gourry. Auscultation microsismique appliquée à la détection des éboulements des falaises crayeuses. Journées nationales de géotechnique et de géologie, Jun 2004, Lille, France. pp.275-284. ineris-00972460

HAL Id: ineris-00972460

https://ineris.hal.science/ineris-00972460

Submitted on 3 Apr 2014

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.

AUSCULTATION MICROSISMIQUE APPLIQUEE A LA DETECTION DES EBOULEMENTS DES FALAISES CRAYEUSES

MICROSEISMIC MONITORING APPLIED TO DETECTION OF CHALK CLIFF COLLAPSES

G. SENFAUTE[1], J. C. GOURRY[2]
[1]*INERIS - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques*
Ecole des Mines. Parc de Saurupt F-54042, Nancy Cedex
e-mail :gloria.senfaute@ineris.fr
[2]*BRGM – 3 Avenue Claude Guillemin – BP 6009 Orléans, France*
e-mail : jc.gourry@brgm.fr

RÉSUMÉ - L'auscultation microsismique menée sur une falaise maritime en tant que site expérimental a démontré que les microruptures d'un massif de craie sont détectables par un dispositif de capteurs de type géophone et accéléromètre. Elle a aussi montré les capacités de la méthode microsismique à détecter les signes précurseurs d'un éboulement. L'étude a permis d'établir les paramètres pour le dimensionnement d'un système de surveillance micro-sismique opérationnel d'un risque d'éboulement des falaises crayeuses.

ABSTRACT - The microseismic monitoring carried out on an experimental site showed that the chalk rock ruptures are recordable by a seismic network composed of geophones and accelerometers. The microseismic method also showed the capacity to detect the precursory signs of a cliff collapse. This study enabled to dimension the essential parameters for the implementation of an operational microseismic system to monitor unstable cliffs zones and predict rock-falls hazard.

1. Introduction

Les fréquents éboulements de falaises côtières et le recul des côtes qu'ils engendrent mettent en danger la vie et les biens des populations riveraines. Ce problème concerne de nombreux pays européens. En France, particulièrement en Normandie, des éboulements massifs (plusieurs milliers de m^3) ont lieu régulièrement. La falaise peut ainsi reculer de 2 à 3 mètres sur 20 à 30 mètres de longueur. Comment anticiper ces phénomènes d'effondrement ? Quelle méthode de surveillance adopter pour mieux prévoir l'évolution de ces falaises ? Pour répondre à ces questions, un programme de recherche européen PROTECT[1] regroupant plusieurs pays a été mis en œuvre (Busby et al. 2002).

La problématique de prévision des effondrements des falaises (côtières ou continentales) est très complexe, et les recherches sur ce sujet ne sont pas très nombreuses. Les méthodes couramment utilisées pour suivre les déformations du massif sont des méthodes de topométrie, d'extensométrie et d'inclinométrie. Cependant, ces méthodes n'ont qu'un très faible rayon de couverture et une surveillance à grande échelle deviendrait trop coûteuse, voire inaccessible. Le développement des systèmes de surveillance à plus grande échelle adaptés à la prévision des éboulements des falaises est l'objectif principal du programme européen PROTECT. Dans ce cadre, la méthode microsismique a été mise en œuvre sur un site expérimental. Cette méthode est aujourd'hui appliquée avec succès dans différents contextes : la surveillance de la sismicité induite par les travaux d'extraction dans les mines en activité, particulièrement dans les mines profondes de charbon (Mendecki 1993, Senfaute et al. 1997, Senfaute et al. 2001) ;

[1] PROTECT Prediction Of The Erosion of Cliff Terrains. Les pays européens partenaires sont : Royaume Uni, Danemark, Italie, Pologne, France.

le suivi de la stabilité des mines arrêtées (Abdul-Wahed et al. 2000, Senfaute et al. 2000) ; le contrôle de l'injection des fluides en géothermie (Niitsuma et al. 1987) ainsi que pour la surveillance de stockages souterrains ou des installations sensibles. L'objectif essentiel de cette recherche est : d'adapter la méthode microsismique pour la surveillance à grande échelle des falaises crayeuses, de déterminer les capacités de la méthode à détecter des signes précurseurs des éboulements et d'établir les paramètres pour le dimensionnement d'un système opérationnel de surveillance et d'alerte.
En décembre 2001, un site expérimental a été sélectionné et les équipes du projet ont réalisé l'instrumentation de la falaise. Le dispositif microsismique installé est composé de géophones et accéléromètres. Ces capteurs enregistrent, dans les hautes et basses fréquences, les craquements du massif rocheux. Ce dispositif a été complété par des mesures de déformation avec des capteurs de type extensomètre, par des mesures de la teneur en eau (capteur humilog) et par des cellules de pression mesurant la variation de contrainte induite par des possibles mouvements verticaux de la partie supérieure de la falaise avant l'éboulement. Tous ces capteurs sont installés dans le massif crayeux à partir de la paroi de la falaise. Une station météorologique, installée en tête de falaise, complète le dispositif de surveillance et permet de mesurer la température, la pression atmosphérique, la pluviométrie, ainsi que la direction et la vitesse du vent.

Cet article présente les résultats de plus de deux années d'auscultation microsismique continue, la détection et l'analyse d'un éboulement ayant affecté la zone instrumentée entraînant environ 2000 m^3 de matériau rocheux éboulé, et les enseignements nécessaires au dimensionnement d'un système de surveillance opérationnel du risque d'éboulement qui serait utile aux Services de l'Etat chargés de la sécurité des personnes et des biens, vis-à-vis des risques naturels.

2. Le site expérimental

Afin de mettre en œuvre l'instrumentation, il fallait trouver un site présentant des symptômes évidents de rupture et un risque potentiel d'éboulement. Plusieurs sites ont été visités et ont fait l'objet d'un relevé de fractures et d'une analyse qualitative des instabilités potentielles.

Le choix du site s'est finalement porté sur la falaise de Mesnil-Val près du Tréport en Haute Normandie. L'état du massif du secteur, la disposition et la taille des fissures permettaient de diagnostiquer un risque d'éboulement dans un délai relativement court. De plus, d'accès facile, le site offrait de bonnes conditions pour mettre en place l'ensemble de l'instrumentation et une maison abandonnée à proximité de la falaise pouvait abriter les différents instruments d'acquisition des données.

Le site sélectionné consiste en une falaise crayeuse de 50 mètres de hauteur, 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, ce banc constitue la portion de falaise soumise directement à l'action des vagues ; la deuxième série, partie supérieure de la falaise, est constituée d'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 d'une couche marneuse épaisse de 20 cm environ.

2.1 Etude de la fracturation du site expérimental de Mesnil-Val

Une campagne d'analyse structurale spécifique à la région de Mesnil-Val a été menée afin de déterminer les caractéristiques de la fracturation du massif et de repérer des indices sur les mécanismes de rupture prépondérants. La fracturation majeure de direction NW-SE est sub-verticale et sub-perpendiculaire à la falaise. Les fractures sont ouvertes d'une dizaine de centimètres avec, en général, un remplissage argileux. Une deuxième fracturation de

décompression est sub-parallèle à la falaise. Ces deux familles de fractures, associées à une stratification sub-horizontale, conduisent à un découpage de la falaise en parallélépipèdes, qui pourrait contribuer à l'instabilité de la falaise.

2.2 Illustration des mécanismes d'érosion des falaises de Mesnil-Val

L'observation du front de falaise et des différents indices d'instabilité repérés lors de la campagne d'analyse structurale a permis d'émettre des hypothèses quant aux mécanismes de ruptures attendus ou en vigueur sur les reliefs côtiers du site expérimental de Mesnil-Val :

- *Cavités en pied de falaise.* Ce sont des zones situées dans le banc de craie massif, elles se présentent sous forme de sous-cavages liés à un élargissement des discontinuités en pied de falaise (figure 1). Lorsque ces ouvertures deviennent importantes, des blocs de plusieurs m^3 peuvent devenir instables et se décrocher. Cette instabilité peut s'expliquer par l'action des vagues à l'intérieur des joints de fractures créant ainsi une surpression à l'origine du descellement des blocs.
- *Ruptures en écailles.* Elles sont quasi parallèles au front de falaise et pourraient être dues à un phénomène progressif de décompression du massif. On observe une famille de fractures subparallèles à la paroi qui, associées à la fracturation dominante, permet le découpage du massif en dièdres susceptibles de tomber facilement. Ce type de rupture donne lieu à des éboulements gravitaires, de plus ou moins grande importance.
- *Zones de broyage.* Ces zones sont observées au cœur des systèmes de failles conjuguées où la contrainte de compression est particulièrement forte (figure 2). Elles se localisent dans certains points du front de falaise et seraient dues à des efforts tectoniques du massif conduisant à la déformation des couches lithologiques allant parfois jusqu'au broyage.

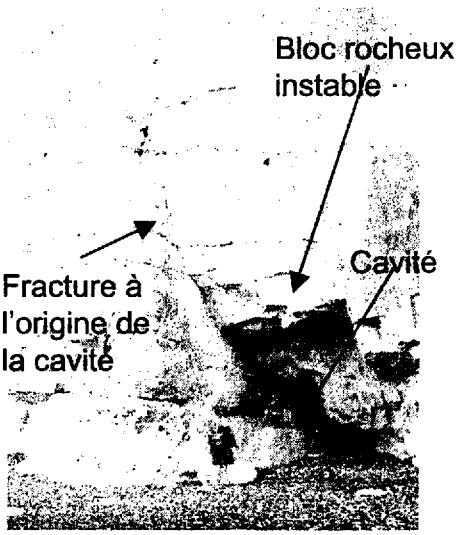


Figure 1 : Cavité d'érosion issue d'un élargissement de fracture

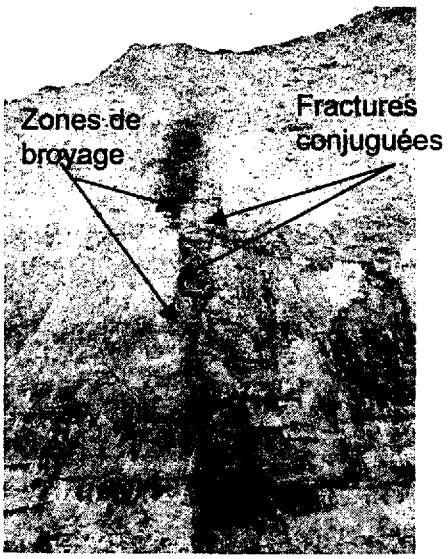


Figure 2: Zones de broyage dans un système de fractures conjuguées

Les mécanismes d'instabilités présentés ci-dessus constituent les principaux modes observés sur le site expérimental. Néanmoins, il semble que les instabilités ne soient pas dues principalement au jeu de failles présentes sur le site mais plutôt au phénomène de décompression du massif aggravé par le découpage en blocs. Au vu des effondrements observés le long de toute la région côtière, les résultats des recherches montrent que les processus d'effondrements peuvent être multiples, complexes et que l'infiltration de l'eau de mer et de pluie constituerait un facteur aggravant et déclencheur de la plupart des éboulements. (De Pomerai 1999).

3. Choix et mise en oeuvre de l'instrumentation

La craie présentant un comportement mécanique très particulier, le type de rupture pouvant survenir sur le site d'étude et les capacités d'un système à les enregistrer sont assez difficiles à prévoir. Une attention particulière a donc été portée au choix des capteurs adaptés et à la configuration du réseau.

La fréquence des signaux générés par la rupture de la craie étant à priori inconnue, il était indispensable de choisir un dispositif permettant d'enregistrer des signaux sur une large bande de fréquence avec une très bonne sensibilité. Pour cela, un dispositif spécifique a été développé. Il est constitué d'un capteur de type géophone (bande passante de 40 à 1 500 Hz) couplé à un capteur de type accéléromètre (bande passante de 20 à 10 000 Hz).

Les observations du front de falaise et des ruptures susceptibles d'agir sur ce type de massif suggèrent que la plupart des mouvements seraient verticaux avec une propagation des fractures du bas vers le haut. Les capteurs, de type unidirectionnel, ont été installés en position verticale. Cela a impliqué la conception d'un système permettant l'installation de capteurs (géophone et accéléromètre) en position verticale dans un sondage horizontal. La figure 3 illustre le système de berceau utilisé pour installer les capteurs (couple géophone accéléromètre) dans des sondages horizontaux forés sur le front de la falaise.

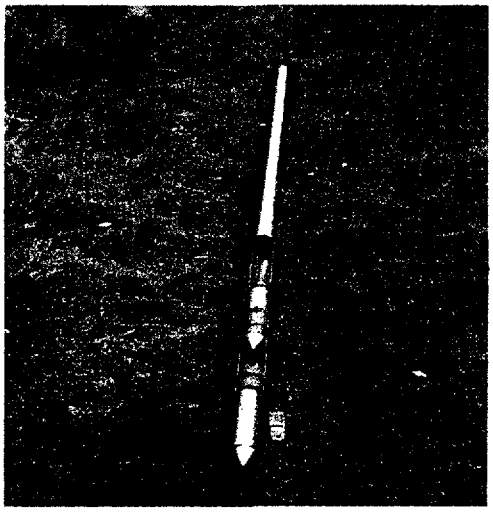


Figure 3 : Dispositif des géophones et accéléromètres

La configuration du réseau de capteurs retenue permet d'encadrer une série de failles conjuguées susceptibles de donner lieu à des éboulements de paroi. L'écartement optimum des capteurs a été effectué de manière à concilier la nécessité de caractériser un massif assez étendu et celle d'avoir des capteurs suffisamment proches pour pouvoir enregistrer des signaux sismiques dont les caractéristiques ne sont pas à priori connues. La distance maximale entre deux capteurs a donc été fixée à 50 mètres. Une station de mesure microsismique est constituée d'un couple géophone/accéléromètre, 5 stations ont été installées : 3 dans des sondages horizontaux forés sur le front de la falaise et profonds de 6 mètres et 2 dans des sondages verticaux forés sur le plateau de la falaise, profonds de 10 mètres et situés à 10 mètres du bord de la falaise. Le réseau de stations a été complété par un dispositif de mesure de déformation (extensomètres en sondage), d'humidité, et par des cellules de pression placées à environ 10 mètres de hauteur du pied de la falaise. La figure 4 présente la configuration de l'ensemble de l'instrumentation mise en place sur le site expérimental. Une centrale d'acquisition placée en haut de la falaise réalise l'acquisition des données et leur transmission automatique vers des centrales de stockage et de traitement placées dans les laboratoires concernés.

4. Activité microsismique enregistrée

Depuis janvier 2002, des événements microsismiques ont été enregistrés. Les événements sont de deux types : événements enregistrés deux fois par jour (pendant la marée haute) et des événements enregistrés hors marée haute. La population d'événements enregistrés pendant les heures de marée haute arrive en rafale et constitue plusieurs milliers d'événements. Les premières analyses ont été effectuées pour valider l'hypothèse selon laquelle les signaux de cette population étaient bien imputables à la marée. Une étude systématique du coefficient de marée, du nombre d'enregistrements et de périodes de déclenchement des événements a été effectuée (figure 5). Elle a montré une très nette corrélation entre les différents paramètres et

permet de valider l'effet de la marée sur le déclenchement d'une population d'événements. Il ressort de cette analyse qu'en deçà d'un coefficient de marée d'environ 50, il n'y a pas d'événements générés par la marée.

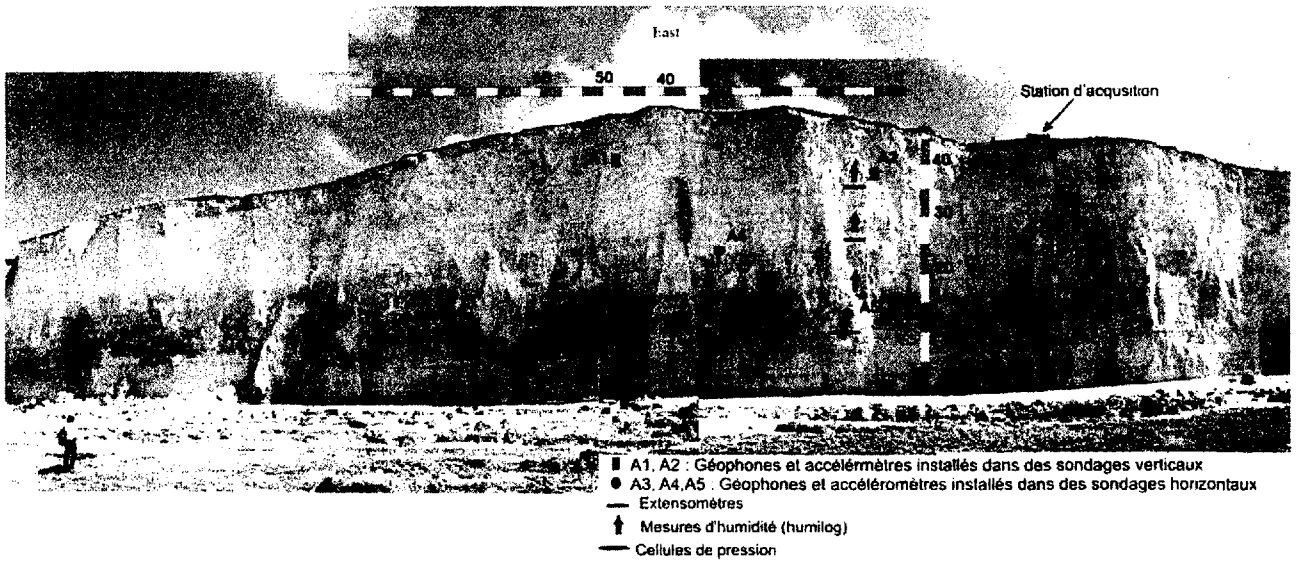


Figure 4 : Configuration du réseau de capteurs installés sur le site expérimental de Mesnil-Val.

Les événements enregistrés pendant la marée haute constituent une population très intéressante pour étudier l'effet dynamique du choc de la marée contre la falaise et de son effet sur la stabilité du massif. Cependant, cette première phase de la recherche a été consacrée à l'étude des événements microsismiques générés par la rupture du massif hors influence directe de la marée et à connaître dans quelle mesure ces événements peuvent être des signatures prédictives d'un éboulement.

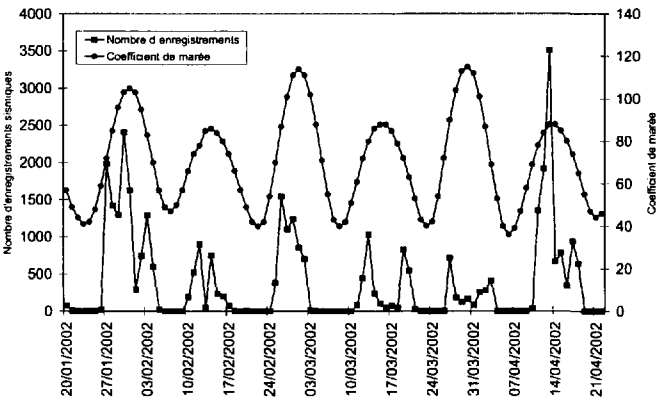


Figure 5 : Corrélation entre le coefficient de marée et les enregistrements sismiques

Dans cette étude nous nous intéressons uniquement aux événements enregistrés hors des heures de marée haute. L'étude de la signature de cette catégorie d'événements montre qu'elle serait associée à des ruptures et/ou aux réajustements à l'intérieur du massif ausculté. Ces événements enregistrés hors marée haute sont caractérisés par une fréquence importante, comprise entre 500 et 8000 Hz. Pour la plupart des événements, les signaux n'ont été enregistrés que par une seule station, très peu d'événements ont été enregistrés sur l'ensemble des 5 stations sismiques de mesure. Ceci s'explique par le caractère très atténuant du massif de craie et par le fait que les signaux sont constitués de hautes fréquences, très rapidement atténués. La figure 6 illustre un exemple de signal microsismique associé à des ruptures du massif de craie.

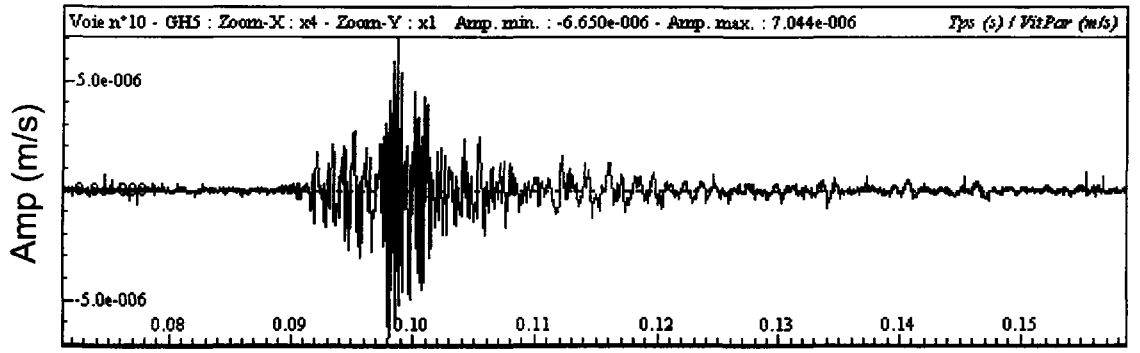


Figure 6 : Exemple d'un signal microsismique enregistré par un capteur géophone dans le site expérimental de Mesnil-Val

5. Evolution de l'activité micro-sismique et détection d'un éboulement

L'étude de l'évolution de l'activité micro-sismique est effectuée à partir du calcul du flux d'énergie sismique libérée par événement. Ce calcul est réalisé par la relation ci-dessous, qui permet une estimation du flux d'énergie sismique émise par la source et enregistrée au niveau du capteur (Boatwright 1980).

$$F = \rho c \int_{1}^{2} V^2(t)\, dt \qquad (1)$$

ρ : masse volumique du milieu (kg/m^3) ;
c : vitesse de propagation des ondes de groupe (m/s)
V : vitesse particulaire (m/s)
t : durée du signal (s)

Lors des 6 premiers mois d'enregistrement, des événements microsismiques associés aux ruptures du massif rocheux ont été enregistrés. Toutefois, pendant ces 6 premiers mois de suivi, l'activité microsismique est resté très faible et n'a généré aucun changement significatif de la courbe d'énergie sismique libérée par jour (figure 7) et aucune signature d'éboulement n'a été observée sur le site. Le 23 juin 2002 à 3h00 du matin, un important éboulement s'est produit au centre de la zone instrumentée avec un volume de roche éboulé d'environ 2000 m^3 (figure 7). L'éboulement a été précédé d'une importante activité microsismique avec une anomalie importante en énergie sismique libérée dans la journée du 23 juin (figure 8). Les événements associés à l'éboulement n'ont été enregistrés que par le capteur situé au centre de la zone éboulée. Les autres capteurs sismiques, les capteurs de déformation placés autour de la zone éboulée et les cellules de pression n'ont pas enregistré le phénomène.

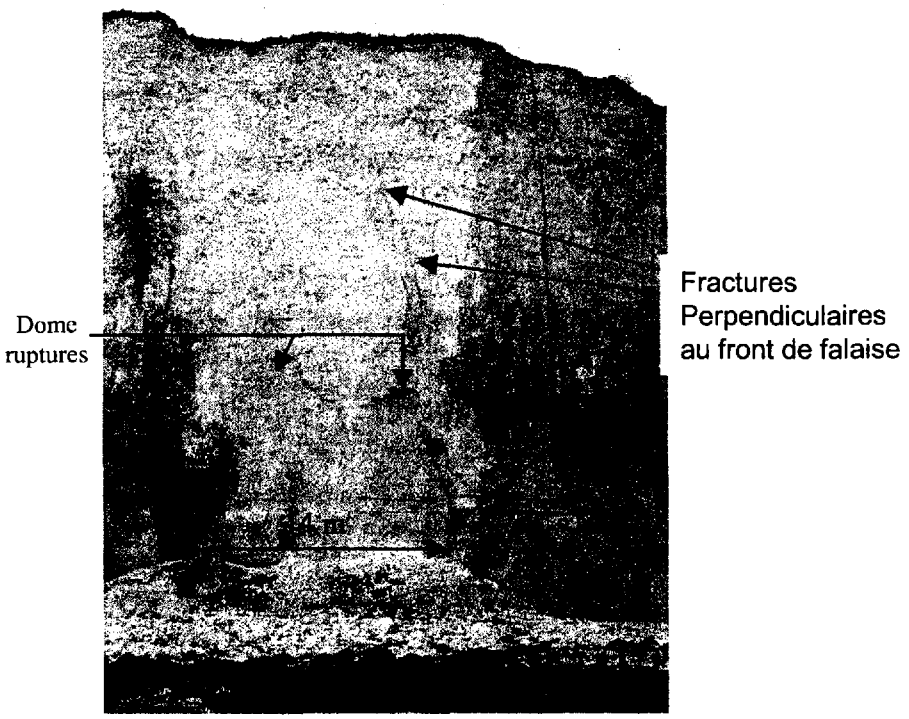


Figure 7 : Eboulement du 23 juin ayant affecté le centre de la zone instrumentée. Le volume de matériau éboulé est d'environ 2000 m^3.

L'analyse des événements enregistrés pendant la journée de l'éboulement montre que l'activité microsismique apparaît environ 15 heures avant que celui-ci ne se produise (figure 9). Le 23 juin à 03h00 du matin, le système d'écoute enregistre des signaux de très faible énergie. Pendant toute la journée du 23, l'enregistrement d'événements se poursuit avec une progression aussi bien en nombre qu'en énergie sismique libérée. Une forte accélération du nombre d'événements et de l'énergie sismique s'est produite environ 2 heures avant l'éboulement (figure 9). A 19h18 l'éboulement s'est produit au centre de la zone instrumentée.

Après l'éboulement du 23 juin 2003, et pendant plus d'une année de surveillance, aucune autre anomalie sismique ne s'est produite (figure 8) et sur site aucune anomalie n'a été constatée.

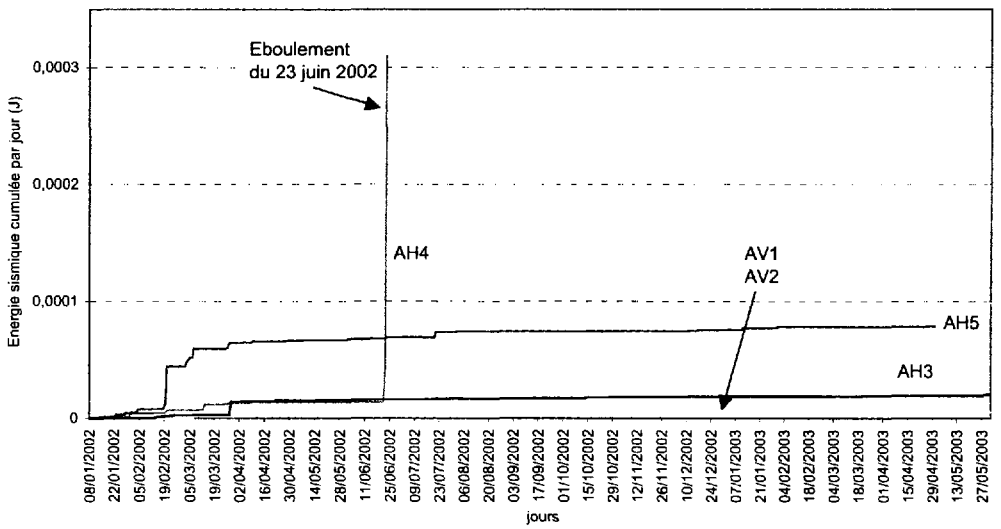


Figure 8 : Evolution journalière de l'énergie sismique enregistrée par chaque station microsismique. Le graphique présente l'évolution des 5 accéléromètres installés sur le front de la falaise (A : accéléromètre, H : capteur installé dans un sondage horizontal, V : capteur installé dans un sondage vertical).

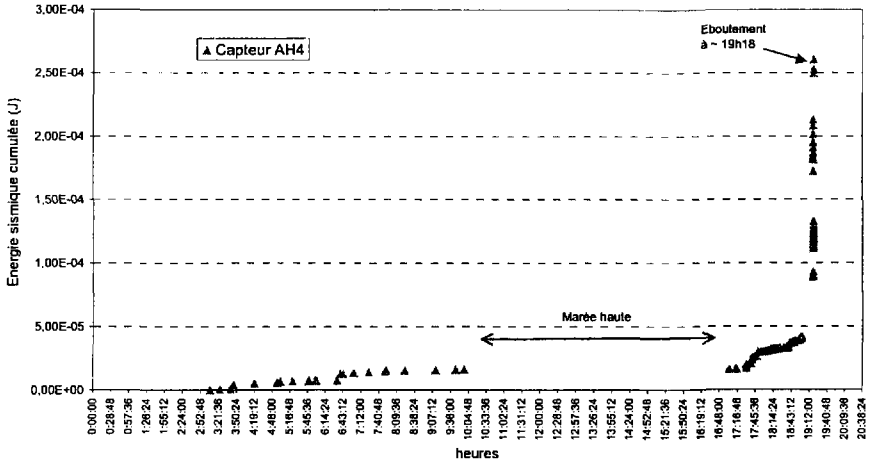


Figure 9 : Evolution de l'énergie sismique libérée par heure pendant la journée de l'éboulement.

6. Indications pour le dimensionnement d'un système de surveillance opérationnel

Les résultats expérimentaux ont montré que le dispositif microsismique utilisé était tout à fait adapté à l'enregistrement des signaux émis par la rupture du massif de craie. Ils ont aussi démontré les capacités de la méthode à donner des signaux prévisionnels de l'arrivée imminente d'un éboulement, et ceci environ 15 heures avant que l'éboulement ne se produise.

Cependant, malgré ces résultats tout à fait encourageants, la méthode présente des limites qui doivent être prises en considération pour le dimensionnement d'un système de surveillance dans le contexte d'un massif crayeux. Ces limites sont intégrées dans les propositions, présentées ci-après, pour le dimensionnement d'un premier système de surveillance microsismique pouvant être opérationnelle pour la surveillance des falaises crayeuses.

-Rayon de surveillance. Lors de l'éboulement du 23 juin, 99% des signaux n'ont été enregistrés que par la station de mesure située au centre de la zone éboulée. Les capteurs situés à environ 30 mètres de cette station n'ont enregistré aucun signal. Ces résultats mettent en évidence que le massif de craie, par ses caractéristiques mécaniques exceptionnelles et sa fracturation, induit une atténuation anélastique du signal sismique très importante. Du fait de cette atténuation, le rayon de surveillance d'un capteur, dans ce contexte, est inférieur à environ 30 mètres.

-Type de capteur. L'étude fréquentielle des signaux microsismiques générés par les ruptures du massif de craie a montré que la bande fréquentielle des signaux est assez large, elle se situe entre 500 et 8000 Hz. Ceci implique que les mécanismes à l'origine des événements sont certainement très divers. Il peut s'agir de mouvements sur des plans pré-existants, de la propagation de la rupture des plans pré-existants, de la création de nouvelles ruptures ou d'une combinaison de ces différents mécanismes. Une première approche d'analyse des signaux pour identifier les mécanismes de rupture dans le contexte des falaises crayeuses a été effectuée (Senfaute et al. 2003). Cette étude a identifié plusieurs populations d'événements nettement différentes en termes de signature spectrale mettant en évidence plusieurs mécanismes responsables de l'activité microsismique enregistrée. Suivant ces résultats, le dispositif adapté à la surveillance des roches de craie devra être composé de capteurs large bande et suffisamment sensibles. Le dispositif de capteurs couplés (géophone/accéléromètre) utilisé sur le site expérimental est bien adapté pour la surveillance des roches de craie. Le couplage de ces deux types de capteurs permet de couvrir toute la bande fréquentielle des signaux enregistrés. Par ailleurs, à différence des capteurs utilisés sur le site expérimental, les capteurs doivent être de type tridirectionnel, cela permettra de donner une indication de la position de la source, même si les signaux ne sont enregistrés que par une seule station de mesure.

-Nombre et position des capteurs sur le front de falaise. Le nombre de capteurs dépendra des dimensions du secteur à surveiller. Une station serait susceptible de surveiller un rayon inférieur à 30 mètres, il n'y a pas d'éléments pour donner la limite exacte de ce rayon de surveillance. D'autres applications et plus de recherche sont nécessaires pour aboutir à une meilleure connaissance de ce rayon de surveillance. La position des capteurs dépendra de la position des ruptures et/ou des zones les plus instables ainsi que des mécanismes de ruptures attendus. Avant d'installer un réseau, l'étude structurale et l'identification précise des zones à risque seront indispensables.

-Profondeurs des capteurs par rapport au front de falaise. Suite aux éboulements enregistrés dans la région, ceux-ci semblent avoir une profondeur allant de 2 à 4 mètres par rapport au front de la falaise. Pour le site expérimental de Mesni-Val, le massif de roche éboulée était d'environ 2000 m^3 et la profondeur d'environ 2 mètres. Le capteur installé à 6 mètres de profondeur dans le secteur de l'éboulement a enregistré les signaux des ruptures se produisant entre la surface du front et 2 mètres de profondeur. Une profondeur de 6 mètres semble ainsi adaptée au dispositif de surveillance. De plus, le capteur peut continuer à fonctionner après un éboulement. Dans le cas du site expérimental, les câbles de connexion ont été arrachés mais le capteur est resté intact et la connexion a pu être rétablie.

7. Conclusions

L'auscultation microsismique menée sur le site expérimental de Mesnil-Val a permis de démontrer que les micro-ruptures émises par le massif de craie sont détectables par le dispositif de capteurs de type géophone et accéléromètre installé sur le site.

Cette recherche a permis de démontrer que la méthode d'écoute microsismique est capable de détecter les signes précurseurs d'un éboulement et ceci environ 15 heures avant que celui-ci ne se produise. Les résultats de cette expérimentation ont permis d'établir les paramètres essentiels pour le dimensionnement d'un premier système de surveillance opérationnelle et d'alerte d'un risque imminent d'effondrement dans le contexte des falaises de craies.

L'étude des mécanismes générateurs des éboulements de falaises n'a pas été abordée dans cette recherche. Cependant, ce point est essentiel de l'aborder par le biais de modèles numériques et d'essais de laboratoire pour avancer dans la compréhension des mécanismes complexes à l'origine des éboulements des falaises. Ces aspects sont fondamentaux car, pour mieux prévoir les phénomènes d'éboulements des falaises, il est indispensable de les comprendre.

8. Remerciements

Nous remercions la Communauté Européenne pour le financement du projet européen PROTECT (EVK3-CT-2000-00029) ayant permis l'instrumentation du site de Mesnil-Val en Haute Normandie et particulièrement les partenaires du programme (Rory Mortimore, James Lawrence, Jonathan Busby, Andrew Thrower,) avec lesquels les discussions furent précieuses pour la réalisation de cette recherche. Nous remercions également le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie pour l'aide financière apportée à la réalisation de cette recherche.

9. Références Bibliographiques

Abdul-Wahed M., Senfaute G., Piguet J.P. (2001) Source location estimating using single three-component seismic station. *EUROCK Symposium.* 15th – 18th October 2001, Espoo Finland, pp. 230-235.

Boatwright J. (1980) A spectral theory for circular seismic sources ; simple estimates of sources dimensions, dynamic stress drop and radiated seismic energy. Bull. Seism. Soc. Am. 70,1- 26

Busby J.P., Gourry J.C., Senfaute G., Pedersen S, Mortimore R. (2002) Can we predict coastal cliff failure with remote, indirect measurements. In *instability, planning and management* (eds R. McInnis & J. Jakeways), London : Thomas Telford: 203-208.

De Pomerai M.R. (1999) Hazards associated with Cliff Collapse in the Chalk between Eastbourne and Brighton, Sussex, UK. *Geohazard assessment MSc, University of Potsmoutg School of Earth, Environmental and Physical Sciences* (technical report, 96 pages).

Mendecki A. J. (1993) Real-Time quantitative seismology in mines. In *Rock Burst of seismicity and mines*. Rotterdam: Balkema. 340 pages.

Niitsuma H. Chubachi N., Takanohashi M. (1987). Acoustic analyses of a geothermal reservoir and its application to reservoir control. Geothermics. 16: 47-60.

Senfaute G., Chambon C., Bigarre P., Guise Y., Josien J.P. (1997) Spatial Distribution of Mining Tremors and the Relationship to Rockburst Hazard. *Pure and Applied Geophysics*, 150: 451-459.

Senfaute G., Abdul-Wahed M., Piguet J.P., Josien J.P. (2000). Qualification of the microseismic monitoring technique applied to the risk of collapse in iron ore mines. *EUROCK Symposium*, 14th – 17th September 2000, Aachen, pp. 597-602

Senfaute G., Al-Heib M., Josien J.P., Noirel J.F. (2001) Detection and monitoring of high stress concentration zones induced by coal mining using numerical and microseismic methods. International conference on Rockbursts and Seismicity in Mines-RaSiM5, 17th – 19th September 2001, South Africa. pp. 453-456.

Senfaute G., Merrien-Soukatchoff V., Morel J. (2003) Microseismic monitoring applied to prediction of chalk cliffs collapses and contribution of numerical modelling, International Conference on Fast slope movements-prediction and prevention for risk mitigation, . Luciano Picarell (ed.), 11th-13th May 2003, Naples Italy, pp. 463-468.