

Collection EDYTEM

Numéro 19 - Année 2017

Coordination :
Emmanuel Malet
Laurent Astrade

MONITORING EN MILIEUX NATURELS

RETOURS D'EXPÉRIENCES EN TERRAINS DIFFICILES

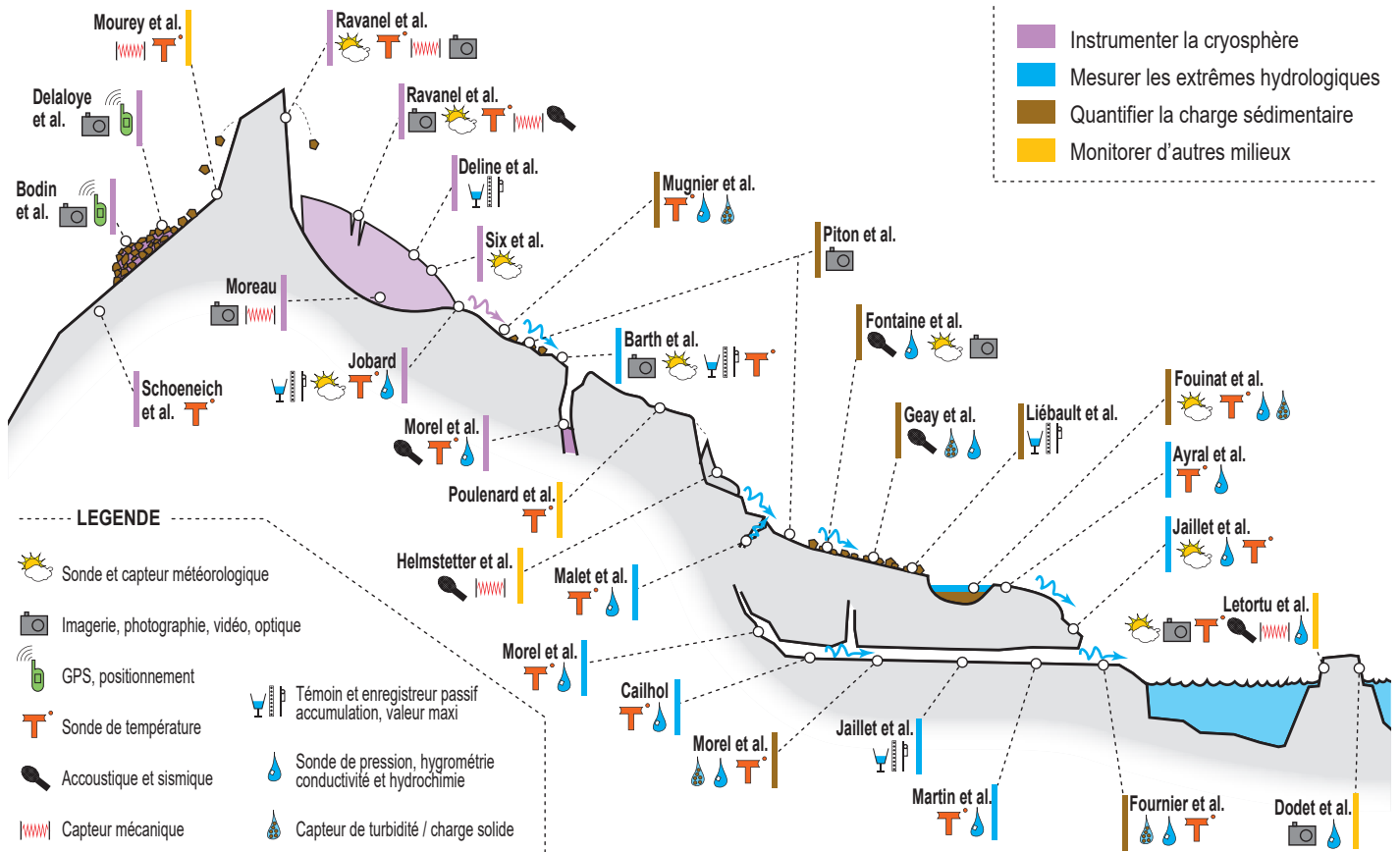


Sommaire

Éditorial, par FABIEN ARNAUD	3
Avant-propos, par EMMANUEL MALET, LAURENT ASTRADE	4
Introduction - Monitorer les milieux naturels, entre ambitions et contraintes, une affaire de compromis. Par EMMANUEL MALET, LAURENT ASTRADE, CHRISTOPHE GAUCHON, STÉPHANE JAILLET	9
Le monitoring énergétique pour les systèmes d'acquisition en milieu naturel difficile. Par LIONEL DARRAS, ARMAND MARISCAL	19
Instrumenter la cryosphère	25
Instrumentation thermique et cinématique des parois à permafrost du massif du Mont Blanc. Par LUDOVIC RAVANEL, EMMANUEL MALET, PIERRE-ALLAIN DUVILLARD, FLORENCE MAGNIN, PHILIP DELINE, GRÉGOIRE GUILLET, FABRIZIO TROILO, PAOLO POGLIOTTI, UMBERTO MORRA DI CELLA, JAN BEUTEL, STEPHAN GRUBER	27
Suivis par GPS et webcam de glaciers rocheux à mouvement rapide. Par REYNALD DELALOYE, CHRISTOPHE LAMBIEL	39
L'apport d'appareils photo reflex autonomes pour le suivi quasi-continu de la dynamique des glaciers rocheux. Exemples dans les Alpes et dans les Andes Par XAVIER BODIN, EMMANUEL MALET, FLAVIEN VERNIER, GUILHEM MARSY, HÉLA HADRI, DARIO TROMBOTTO	47
Les contraintes et difficultés des observations sur les glaciers de montagne. Par DELPHINE SIX, CHRISTIAN VINCENT	55
Dix ans de balises d'ablation sur le glacier d'Estelette (massif du Mont Blanc) pour étudier la dynamique de sa couverture détritique. Par PHILIP DELINE, MARTIN P. KIRKBRIDE	61
Du blanc au-dessus du vide. Monitoring multi-paramètres de la formation et de l'évolution d'un pont de neige au-dessus d'une crevasse sur un glacier alpin. Par LUDOVIC RAVANEL, EMMANUEL MALET, PHILIPPE BATOUX	68
Instrumentation hydrologique et météorologique en milieu glaciaire alpin. Application au glacier du Baunet (Savoie). Par SYLVAIN JOBARD	77
Time lapse, rendre visible l'invisible. Premiers développements et applications au suivi des glaciers. Par LUC MOREAU	87
2Alpes-3065, les tribulations d'un forage d'altitude. Par PHILIPPE SCHOENEICH, JEAN-MICHEL KRYSIECKI	95
Fonte du glacier souterrain de Scarasson (Margareis, Italie). Suivi instrumenté de la température, de l'humidité et du recul. Par LAURENT MOREL, RICHARD MAIRE, FRANÇOIS VALLA, JOAN DECKER, MICHEL SIFFRE, JOFFREY BOSCAR, SERGE CAILLAULT, CATHY LAMBOGLIA, Jo LAMBOGLIA, JEAN-ROBERT PETIT, MICHEL OGAND	101

Mesurer les extrêmes hydrologiques	109
Instrumentation hydrométéorologique spatialisée sur le bassin versant du Vorz (massif de Belledonne). Par THIERRY BARTH, EMMANUEL MALET, GEORGES-MARIE SAULNIER	111
Stratégie de suivi hydrologique spatialement distribué. Application à la compréhension des crues éclair sur les bassins versants cévenols. Par PIERRE-ALAIN AYRAL, ISABELLE BRAUD, GUILLAUME NORD, ENRIQUE GONZALEZ-SOSA, ROSARIO SPINELLI	121
Suivi en continu des températures et conductivités des eaux thermales en contexte hyper minéralisé. Salins-Les-Thermes, Savoie. Par EMMANUEL MALET, MARC DZIKOWSKI, Bernard FANGET, CAMILLE DOUBLET, DOMINIQUE GASQUET	129
Ruissellement et dissolution d'un bassin versant lapiazé des karsts de Patagonie, île Tarlton, archipel de Madre de Dios (Chili). Par STÉPHANE JAILLET, LAURENT MOREL, RICHARD MAIRE, EMMANUEL MALET, GEORGES MARBACH, DENIS MORALES, FLORIAN CHENU, FABIEN HOBLÉA, BERNARD TOURTE, tous les membres des EXPÉDITIONS ULTIMA PATAGONIA	137
La mesure autonome des hauteurs et des températures de l'eau dans les drains des systèmes karstiques. Outils de suivi et approches méthodologiques simples adaptés au milieu souterrain. Par DIDIER CAILHOL	147
Le Lurographe, développement d'un enregistreur autonome motivé par les mises en charge de la grotte de la Luire (Vercors, France). Par LAURENT MOREL, GROUPE SPÉLÉOLOGIQUE VALENTINOIS	161
Suivi à hautes résolutions spatiale et temporelle du système karstique des Fonts (Gard, France). Par PHILIPPE MARTIN, PIERRE-ALAIN AYRAL, JEAN-FRANÇOIS DIDON-LESCOT, JEAN-MARC DOMERGUE, NADINE GRARD.....	169
Instrumentation et analyse de l'érosion régressive en rivière souterraine. Le projet participatif Bilbrupt et la zone des cascades du Rupt du Puits, Lorraine, France. Par STÉPHANE JAILLET, CLAUDE HERBILLON	177
Quantifier la charge sédimentaire	189
Monitoring d'un lac de haute altitude. Le cas du lac de la Muzelle (massif des Écrins). Par LAURENT FOUINAT, EMMANUEL MALET, PIERRE SABATIER, JÉRÔME POULENARD, RICHARD BONET, CLOTILDE SAGOT, FABIEN ARNAUD	191
Mesure de la charge en suspension de torrents proglaciaires. L'exemple des torrents issus du glacier des Bossons. Par JEAN-LOUIS MUGNIER, HERVÉ GUILLON, JEAN-FRANÇOIS BUONCRISTIANI, OLIVIER ROMEYER, PASCALE BASCOU	199
Dynamique géomorphologique des torrents. Intérêt de l'emploi des appareils photographiques automatiques. Par GUILLAUME PITON, JOHAN BERTHET, CORALINE BEL, FIRMIN FONTAINE, HERVÉ BELLOT, EMMANUEL MALET, LAURENT ASTRADE, FRÉDÉRIC LIEBAULT, ALAIN RECKING, MARIE JUPPET, KRISTIAN ROYER	205
Suivi automatisé des crues à fort transport solide dans les torrents. Stratégie de mesure et potentiel des données collectées. Par FIRMIN FONTAINE, CORALINE BEL, HERVÉ BELLOT, GUILLAUME PITON, FRÉDÉRIC LIEBAULT, MARIE JUPPET, KRISTIAN ROYER	213

Monitoring du charriage avec une trappe à fente, observatoire de Draix. Par FRÉDÉRIC LIEBAULT, SÉBASTIEN KLOTZ, HUGO JANTZI, XAVIER RAVANAT	221
La mesure du charriage par acoustique passive en rivière. Par THOMAS GEAY, PIERRE OUSTRIÈRE, SÉBASTIEN ZANKER	227
Suivi du transport particulaire en contexte karstique. Méthode et application. Par MATTHIEU FOURNIER, DAVID VIENNET, NICOLAS MASSEI, JEAN-PAUL DUPONT	235
Instrumentation et caractérisation pour l'étude des dépôts sédimentaires dans les grottes. Par LAURENT MOREL, STÉPHANE JAILLET, VINCENT LIGNIER, RICHARD MAIRE	243
Monitorer d'autres milieux	249
Impacts des vagues et de la circulation d'eau sur la microfracturation des falaises rocheuses. Mise en place d'un suivi multiparamètre en Bretagne. Par PAULINE LETORTU, KATJA LAUTE, NICOLAS LE DANTEC, EMMANUEL AUGEREAU, JÉRÔME AMMANN, CHRISTOPHE PRUNIER, ALAIN HÉNAFF, LAURENCE DAVID, ADELINE MAULPOIX, VÉRONIQUE CUQ, MARION JAUD, BERNARD LE GALL, CHRISTOPHE DELACOURT	251
Mesures de vagues extrêmes le long de falaises rocheuses escarpées, île de Banneg, archipel de Molène, Bretagne. Par GUILLAUME DODET, FABIEN LECKLER, MICHEL OUTRÉ, RONAN AUTRET, FRANCE FLOC'H, NICOLAS LE DANTEC, SERGE SUANEZ	257
Mesure de la fréquentation d'itinéraires d'accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc à l'aide de capteurs pyroélectriques. Par JACQUES MOUREY, LUDOVIC RAVANEL	263
Écoute sismique et acoustique du mouvement de terrain de Séchilienne (massif de Belledonne). Par AGNÈS HELMSTETTER, GAËL JANEX	271
Monitoring des régimes thermiques des sols en montagne. Expériences alpines actuelles. Par JÉRÔME POULENARD, PHILIPPE CHOLER, EMMANUEL MALET	279



Sommaire du Collection EDYTEM n°19

« Monitoring en milieux naturels - Retours d'expériences en terrains difficiles »

IMPACTS DES VAGUES ET DE LA CIRCULATION D'EAU SUR LA MICROFRACTURATION DES FALAISES ROCHEUSES

MISE EN PLACE D'UN SUIVI MULTIPARAMÈTRE EN BRETAGNE

IMPACTS OF WAVES AND WATER CIRCULATION ON ROCK CLIFF MICRO-FRACTURING IMPLEMENTATION OF A MULTI-PARAMETER MONITORING FIELD EXPERIMENT IN BRITTANY

PAULINE LETORTU¹, KATJA LAUTE¹, NICOLAS LE DANTEC^{2,3}, EMMANUEL AUGEREAU²,
JÉRÔME AMMANN², CHRISTOPHE PRUNIER², ALAIN HÉNAFF¹, LAURENCE DAVID¹, ADELIN MAULPOIX¹,
VÉRONIQUE CUQ¹, MARION JAUD², BERNARD LE GALL², CHRISTOPHE DELACOURT²

¹ Univ. Bretagne Occidentale, IUEM, CNRS, UMR LETG, Technopôle Brest-Iroise, 29280 Plouzané,.

² Univ. Bretagne Occidentale, IUEM, CNRS, UMR Géosciences Océan, Technopôle Brest-Iroise, 29280 Plouzané.

³ CEREMA, DTecEMF/ER, rue Bouguer, 29280 Plouzané.

Contact : pauline.letortu@univ-brest.fr

RÉSUMÉ

Pour mieux comprendre les agents et les processus qui contrôlent l'érosion et le recul des côtes rocheuses, un suivi multiparamètre et à haute fréquence a été mis en place entre février et mai 2017 sur les falaises de Porsmilin (Plougonvelin, Finistère, Bretagne). Ce suivi avait pour but de discriminer les contributions respectives des agents et processus subaériens (infiltration, variations du toit de la nappe...) et marins (effet levier engendré par les ondes infragravitaires, impact des vagues...) dans l'évolution de la microfracturation des falaises. Une meilleure connaissance de leurs contributions permettra, à terme, d'améliorer la prévision/prévention de la rupture des falaises.

MOTS-CLÉS : FALAISES, MICROFRACTURATION, IMPACT DES VAGUES, CIRCULATION D'EAU INTERSTITIELLE, ÉROSION, BRETAGNE.

ABSTRACT

In order to gain new insights into the agents and processes controlling hard rock coast erosion and retreat, a high frequency and multi-parameter monitoring field experiment was carried out from February until May 2017 in Porsmilin cliffs (Plougonvelin, Finistère, Brittany). This survey aimed to discriminate the relative contributions of subaerial (groundwater infiltration, water-table variations...) and marine (infragravity wave loading, wave impact...) agents and processes in the evolution of rock microfracturing. A better knowledge of their contributions will allow to improve the forecasting/prevention of cliff failure.

KEYWORDS: COASTAL CLIFFS, MICRO-FRACTURING, WAVE IMPACT, INTERSTITIAL WATER CIRCULATION, EROSION, BRITTANY.

INTRODUCTION

Les travaux sur l'érosion côtière et les risques associés se sont majoritairement intéressés aux côtes d'accumulation au détriment des côtes d'ablation qui représentent pourtant près de 80 % du linéaire côtier mondial (Emery et Kuhn, 1982). Ces côtes d'ablation reculent par à-coups (mouvements gravitaires) et le débat sur les contributions relatives des agents et des processus responsables du déclenchement de ces mouvements reste ouvert. S'il existe un consensus au sein de la communauté scientifique sur l'influence des caractéristiques structurales (lithologie, stratigraphie et tectonique), pour le reste, trois modèles coexistent. Dans le premier, les agents continentaux sont prépon-

dérants dans l'altération (notamment les précipitations) et les actions marines ne constituent qu'un agent de transport et de déblaiement (par exemple Pierre et Lahousse, 2006). Les pressions hydrostatiques engendrées par la circulation d'eau peuvent promouvoir l'altération, agrandir les zones de faiblesse (failles, diaclases) et donc diminuer la résistance aux contraintes des matériaux, favorisant l'instabilité. *A contrario*, la microfracturation peut aussi permettre l'évacuation des surpressions au sein de la falaise. Le second modèle met les actions marines en exergue. Le potentiel de l'action des vagues à déstabiliser la falaise a été démontré par modélisation (Emery et Kuhn, 1982 ;

Sunamura, 1982 ; Trenhaile, 2009) et sur le terrain par des mesures sismiques et/ou acoustiques (Adams *et al.*, 2002 ; Young *et al.*, 2012) ou par des observations topographiques à haute résolution spatiale (réalisées à l'aide d'un scanner laser terrestre) qui montrent les effets d'abrasion, de sous-cavage et d'extraction (Dewez *et al.*, 2013 ; Letortu *et al.*, 2015a). Dans le troisième modèle, le déclenchement des mouvements gravitaires résulte d'une combinaison de facteurs marins et continentaux. C'est ce dernier modèle qui est de plus en plus largement mis en avant, tout en soulignant la difficulté à discriminer la part de chaque facteur dans le déclenchement des mouvements gravitaires (Costa, 2005 ; Letortu *et al.*, 2015b). En effet :

- les données à haute résolution (spatiale et temporelle) portant sur plusieurs années sont rares, tant pour le suivi des mouvements gravitaires que pour celui des agents et des processus à l'origine du déclenchement des mouvements ;

- la relation entre facteur(s) déclenchant(s) et mouvements gravitaires est non linéaire dans le temps et dans l'espace car il existe des combinaisons de facteurs, des phénomènes d'hystérésis, des effets de purge... ;

- le contexte morphostructural et environnemental propre à chaque site complique l'identification du/des facteur(s) déclenchant(s) ainsi que la transposition des résultats d'un site à un autre.

La mise en place d'une instrumentation multiparamètre *in situ* et à haute fréquence sur les falaises rocheuses bretonnes permet de répondre à la question suivante : quels rôles respectifs jouent l'impact des vagues et la circulation d'eau interstitielle dans l'évolution de la microfracturation de ces falaises ? La réponse est déterminante pour la prévision/prévention du déclenchement des mouvements gravitaires. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre suivi instrumental, qui est concomitant à l'écriture de cet article.

SITE D'ÉTUDE

Pour répondre à cette problématique, nous nous sommes intéressés au littoral finistérien de Plougonevelin (plage de *Porsmilin*), dans l'anse de Bertheaume, à proximité de la rade de Brest. Ce site-atelier fait l'objet d'un suivi morphologique et topobathymétrique depuis plusieurs années au sein de l'Observatoire du Domaine Côtier (www-ium.univ-brest.fr/observatoire/observation-cotiere) et du Service National d'Observation Dynalit (www.dynalit.fr/fr). Il s'agit d'une plage sableuse de fond de baie, encadrée par deux éperons rocheux. Celle-ci est en contexte macrotidal, orientée ONO-ESE et adossée latéralement à des falaises à plate-forme d'érosion marine. La partie centrale de la plage correspond à l'embouchure d'un petit fleuve côtier et est séparée de la zone humide, située en amont, par un ancien cordon de galets aménagé avec un remblai. Les

falaises, d'une hauteur moyenne de 20 m, sont taillées dans l'orthogneiss de Brest, avec des filons de granodiorite de Trégana et de quartz. Ces falaises rocheuses présentent une certaine susceptibilité au recul en raison (i) principalement de la forte altération des roches et l'existence de nombreuses failles et diaclases, (ii) de la houle, avec une hauteur significative moyenne de 0,5 m montant à 0,8 à 1,5 m lors de périodes de tempête (Dehouck *et al.*, 2009) et pouvant atteindre jusqu'à 4 m dans des conditions météorologiques exceptionnelles. Le recul des falaises, qui se produit par à-coups (chutes de blocs, éboulements/écroulements) menace actuellement des enjeux tels que le très fréquenté GR 34 ($\approx 60\,000$ passages par an, d'après le compteur installé à la batterie de Toul Logot par la Communauté de Communes du Pays d'Iroise (CCPI)) (Figure 1).

INSTRUMENTATION MULTIPARAMÈTRE *IN SITU* ET À HAUTE FRÉQUENCE

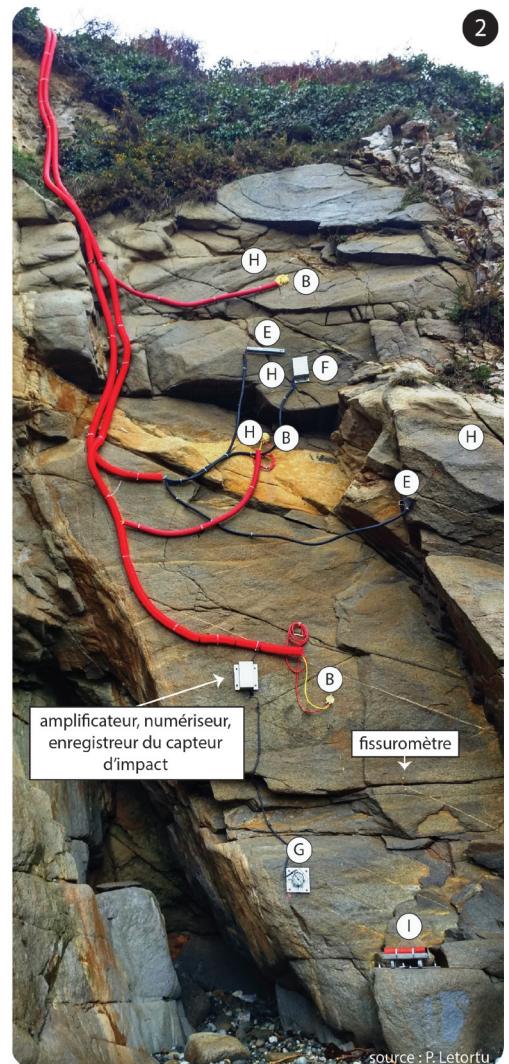
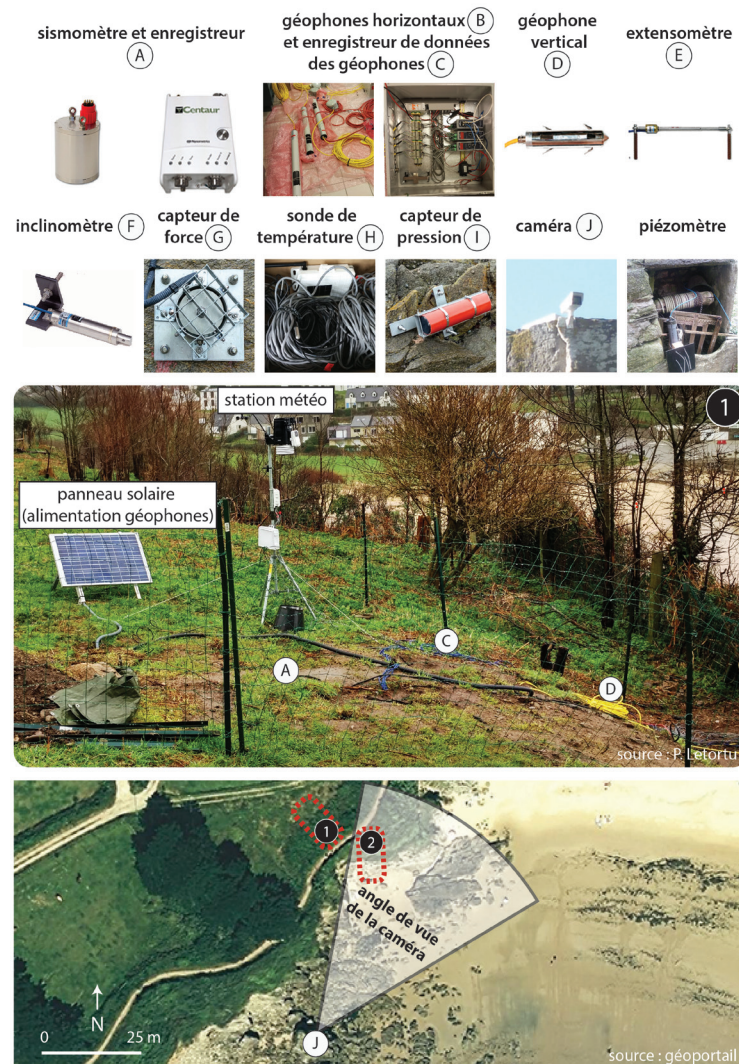
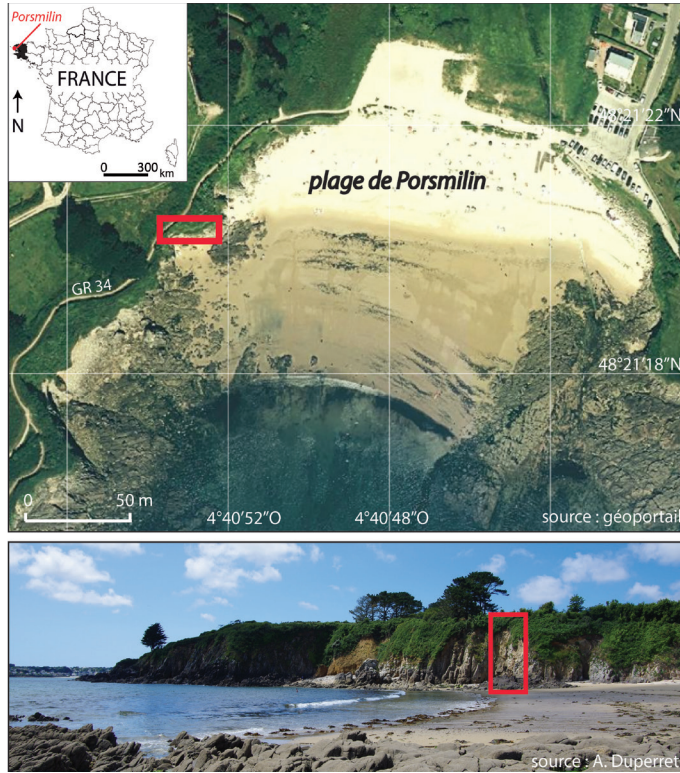
L'instrumentation de la falaise de Porsmilin (Figure 2 et Tableau 1), entre fin février et fin mai 2017, a consisté en un suivi (Laute *et al.*, 2017) :

- de la microfracturation à l'échelle du front de falaise avec quatre géophones, deux extensomètres, deux inclinomètres et vingt fissuromètres. Trois géophones horizontaux ont été installés sur le front de falaise à différentes hauteurs en subsurface (à 0,9 m de profondeur dans le massif rocheux constitué d'orthogneiss) tandis que le géophone vertical a été mis en place en haut de falaise (à 1 m de profondeur dans le sol). Cette configuration a permis de mesurer l'évolution de la microfracturation dans l'espace et dans le temps. Ainsi, les périodes de forte concentration de signaux électro-acoustiques ont été analysées dans le but d'identifier l'agent et le processus responsables

de la réponse mécanique de la falaise (l'impact des vagues, le battement du toit de la nappe...). À proximité des géophones positionnés sur le front de falaise, le suivi de l'évolution d'un certain nombre de failles et de diaclases en surface a été réalisé par les fissuromètres, les deux extensomètres et les deux inclinomètres ;

Figure 1 (page de droite, en haut) - Localisation de la falaise instrumentée à Porsmilin (Plougonevelin, Finistère).

Figure 2 (page de droite, en bas) - Environnement de l'instrumentation et présentation du matériel utilisé.



- des forçages marins comme le niveau d'eau (capteurs de pression) et l'impact des vagues sur la falaise (capteur de force et sismomètre à large bande) associés à un système d'acquisition optique (caméra). La disposition des quatre capteurs de pression le long d'un transect perpendiculaire au front de falaise a permis de connaître précisément le forçage par la houle, notamment la hauteur significative des vagues mais aussi la répartition spectrale de l'énergie incidente (par exemple, la proportion d'ondes infragravitaires). La hauteur atteinte par les vagues sur le front de falaise a été estimée grâce au système d'acquisition vidéo positionné sur un pointement rocheux (analyse des niveaux atteints sur les images *a posteriori*). L'impact causé par la houle sur la falaise ainsi que l'effet levier

engendré par les ondes infragravitaires (sous l'effet de la surcharge exercée par la colonne d'eau en pied de falaise) ont été mesurés respectivement par le capteur de force (disposé en pied de falaise) et le sismomètre à large bande (positionné en haut de falaise). Le premier a quantifié l'énergie dissipée lors de l'impact des vagues en pied de falaise. Le second a fourni les déplacements micrométriques enregistrés en haut de falaise. Le couplage sismomètre/géophones/caméra a permis d'enregistrer la réponse mécanique de la falaise et de visualiser la rupture en temps réel, le cas échéant ;

- des forçages continentaux comme la circulation d'eau dans le massif rocheux (infiltration) et les variations thermiques grâce à la mise en place respectivement d'un piézomètre et d'une station météorologique

Thématique	Instrument	Nb	Localisation	Modèle	Caractéristiques d'acquisition des données et d'alimentation électrique
Micro-fracturation	Géophone (massif rocheux)	3	Front de falaise	Horizontal, triaxial, 4,5 Hz (IMS)	4,5-100 Hz (déclenché à chaque événement) ; alimentation fournie par deux batteries 12 V 38 Ah à recharge solaire (autonomie de 7 à 20 jours en fonction de l'ensoleillement)
	Extensomètre	2	Front de falaise	4420 VW, intervalle 1-25 mm (1») (Geokon)	Horaire ; alimentation fournie par deux batteries D-cell (autonomie de 6 mois)
	Inclinomètre	2	Front de falaise	6350 VW, uniaxial (Geokon)	Horaire ; alimentation fournie par les deux batteries D-cell (autonomie de 6 mois)
	Fissuromètre	20	Front de falaise	Couple de vis	Hebdomadaire
	Géophone (sol)	1	Haut de falaise	Vertical, triaxial 4,5 Hz (IMS)	4,5-100 Hz (déclenché à chaque événement) ; alimentation fournie par deux batteries 12 V 38 Ah à recharge solaire (autonomie de 7 à 20 jours)
Forçages marins	Capteur de force	1	Front de falaise	FN9620-M-10KN (TE connectivity)	1 kHz, déclenché lorsque les vagues atteignent le capteur ; alimentation fournie par deux batteries 12 V 7 Ah (autonomie de 12 à 15 jours en fonction des coefficients de marée)
	Sismomètre	1	Haut de falaise	Trillium Compact Posthole (Nanometrics)	0,01-100 Hz ; alimentation fournie par une batterie 12 V 77 Ah (15-20 jours)
	Capteur de pression	4	Estran	Wave gauge (OSSI)	10 Hz ; alimentation fournie par une batterie 18 V 11 Ah (autonomie de 45 jours)
	Acquisition optique	1	Pointement rocheux sur l'estran	Caméra P-1365-E (Axis)	4 Hz, 1920*1080 pixels, de 2 h avant jusqu'à 2 h après chaque marée haute et 30 min à chaque marée basse ; alimentation fournie par deux batteries 12 V 38 Ah à recharge solaire (autonomie minimale de 7 jours en fonction de l'ensoleillement)
Forçages continentaux	Sonde de température	4	Front de falaise	Sonde de température en acier inoxydable avec terminaison bifilaire, Vantage Pro 2 (Davis)	Horaire ; alimentation fournie par les trois batteries C-cell (jusqu'à 9 mois)
	Station météorologique	1	Haut de falaise	Vantage Pro 2 (Davis)	Pression, précipitations, température, vent (force et direction), humidité et rayonnement solaire au pas de temps horaire ; alimentation fournie par trois batteries C-cell (autonomie jusqu'à 9 mois)
	Piézomètre	1	Haut de falaise	CNR10R (Panatronic)	Horaire ; alimentation fournie par trois piles 1,5 V LR20 (autonomie de plus de 1,5 an)

Tableau 1 - Instruments utilisés et caractéristiques d'acquisition des données et d'alimentation électrique.



Le système d'acquisition vidéo positionné sur un pointement rocheux (au 1^{er} plan) et la falaise instrumentée (au 2^{ème} plan)

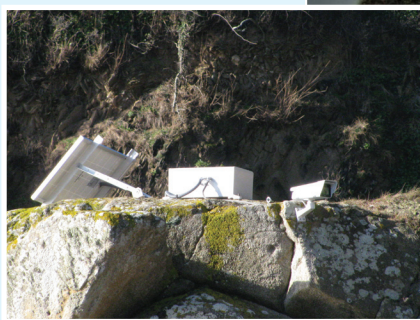


Descente à partir du haut de falaise d'un des géophones horizontaux pour son installation dans le massif rocheux .



Forage réalisé par les cordistes pour la mise en place d'un des trois géophones horizontaux.

Image issue de la caméra lors de la marée haute du 27/02/2017, et détail de l'installation du système d'acquisition vidéo (caméra P-1365-E, Axis), du système d'alimentation à recharge solaire (deux batteries 12 V 38 Ah) et du système de stockage (raspberry PI et disque dur externe) et de transfert (routeur GSM).



équipée de sondes thermiques distantes. En complément des données disponibles dans les communes voisines (www.adès.eaufrance.fr), les variations du toit de la nappe (et donc des pressions hydrostatiques au sein du massif rocheux) en fonction des précipitations et des marées ont été enregistrées grâce à un piézomètre installé dans un puits sur le plateau, à 350 m de la paroi rocheuse instrumentée. La station météorologique a été installée en haut de falaise tandis que quatre sondes

thermiques ont été déployées sur le front de falaise en subsurface (10 cm de profondeur), sur deux lithologies différentes (orthogneiss et granodiorite). Ces sondes ont renseigné sur les variations thermiques des roches du front de falaise (en fonction de l'albédo) qui peuvent favoriser la thermoclastie.

Ce suivi de trois mois a mobilisé, depuis l'installation des capteurs jusqu'au dernier relevé de données, environ 80 hommes-jours.

CONCLUSION

Ce suivi multiparamètre et à haute fréquence sur une durée de trois mois en Bretagne fournit de nouvelles informations sur la part respective de l'impact des vagues et de la circulation d'eau dans la microfracturation des falaises rocheuses. Ces informations par-

ticipient à une meilleure compréhension de l'érosion et du recul des côtes rocheuses. Cette connaissance est essentielle pour une meilleure prévision/prévention des mouvements gravitaires qui peuvent menacer les populations et les biens.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de la région Bretagne dans le cadre du dispositif « Stratégie d'Attractivité Durable » (projet F3) et d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-10-LABX-19-01. Nous remercions également Mme Sanquer, l'équipe municipale de Plougonvelin, la CCPI et la DDTM pour leur accueil enthousiaste et leurs autorisations essentielles au bon déroulement du projet de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS P.N., ANDERSON R.S., REVENAUGH J., 2002. Microseismic measurement of wave-energy delivery to a rocky coast, *Geology*, 30, 895-898.
- COSTA S., 2005. Falaises à recul rapide et plages de galets : de la quantification des dynamiques d'un système complexe à la caractérisation des risques induits. HDR Géographie, Brest, 325 p.
- DEHOUCQ A., 2006. Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère). Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest. URL <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00109373>, 262 p.
- DEWEZ T.J.B., ROHMER J., REGARD V., CNUUDE C., 2013. Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val (Normandy, northern France). In: Conley D.C., Masselink G., Russell P.E., O'Hare T.J. (Eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England). *Journal of Coastal Research*, Special Issue 65, 702-707.
- EMERY K.O., KUHN G.G., 1982. Sea cliffs: their processes, profiles, and classification. *Geological Society of America Bulletin*, 93, 644-654.
- FLOC'H F., LE DANTEC N., LEMOS C., CANCOUËT R., SOUS D., PETITJEAN L., BOUCHETTE F., ARDHUIN F., SUANEZ S., DELACOURT C., 2016. Morphological Response of a Macrotidal Embayed Beach, Porsmilin, France. In Vila-Concejo A., Bruce E., Kennedy D.M., McCarroll R.J. (eds.), Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia). *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 75, 373-377. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- LAUTE K., LETORTU P., LE DANTEC N., 2017. Processes and mechanisms governing hard rock cliff erosion in western Brittany, France. *Geophysical Research Abstracts*, 19, EGU, 2017-3721.
- LETORTU P., COSTA S., MAQUAIRE O., DELACOURT C., AUGEREAU E., DAVIDSON R., SUANEZ S., NABUCET J., 2015a. Retreat rates, modalities and agents responsible for erosion along the coastal chalk cliffs of Upper Normandy: The contribution of terrestrial laser scanning. *Geomorphology*, 245, 3-14. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.05.007
- LETORTU P., COSTA S., CADOR J.M., COINAUD C., CANTAT O., 2015b. Statistical and empirical analyses of the triggers of coastal chalk cliff failure. *Earth Surface Processes and Landforms*. doi: 10.1002/esp.3741
- PIERRE G., LAHOUSSE P., 2006. The role of groundwater in cliff instability: An example at Cape Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 31-45. doi: 10.1002/esp.1229
- SUNAMURA T., 1982. A predictive model for wave-induced cliff erosion, with application to pacific coast of Japan. *Journal of Geology*, 90, 167-178.
- TRENHAILE A.S., 2009. Modeling the erosion of cohesive clay coasts. *Coastal Engineering*, 56(1), 59-72.
- YOUNG A.P., GUZA R.T., ADAMS P.N., O'REILLY W.C., FLICK R.E., 2012. Cross-shore decay of cliff top ground motions driven by local ocean swell and infragravity waves. *J. Geophys. Res. C Oceans*, 117. doi:10.1029/2012JC007908