

Collection EDYTEM

Numéro 19 - Année 2017

Coordination :
Emmanuel Malet
Laurent Astrade

MONITORING EN MILIEUX NATURELS

RETOURS D'EXPÉRIENCES EN TERRAINS DIFFICILES

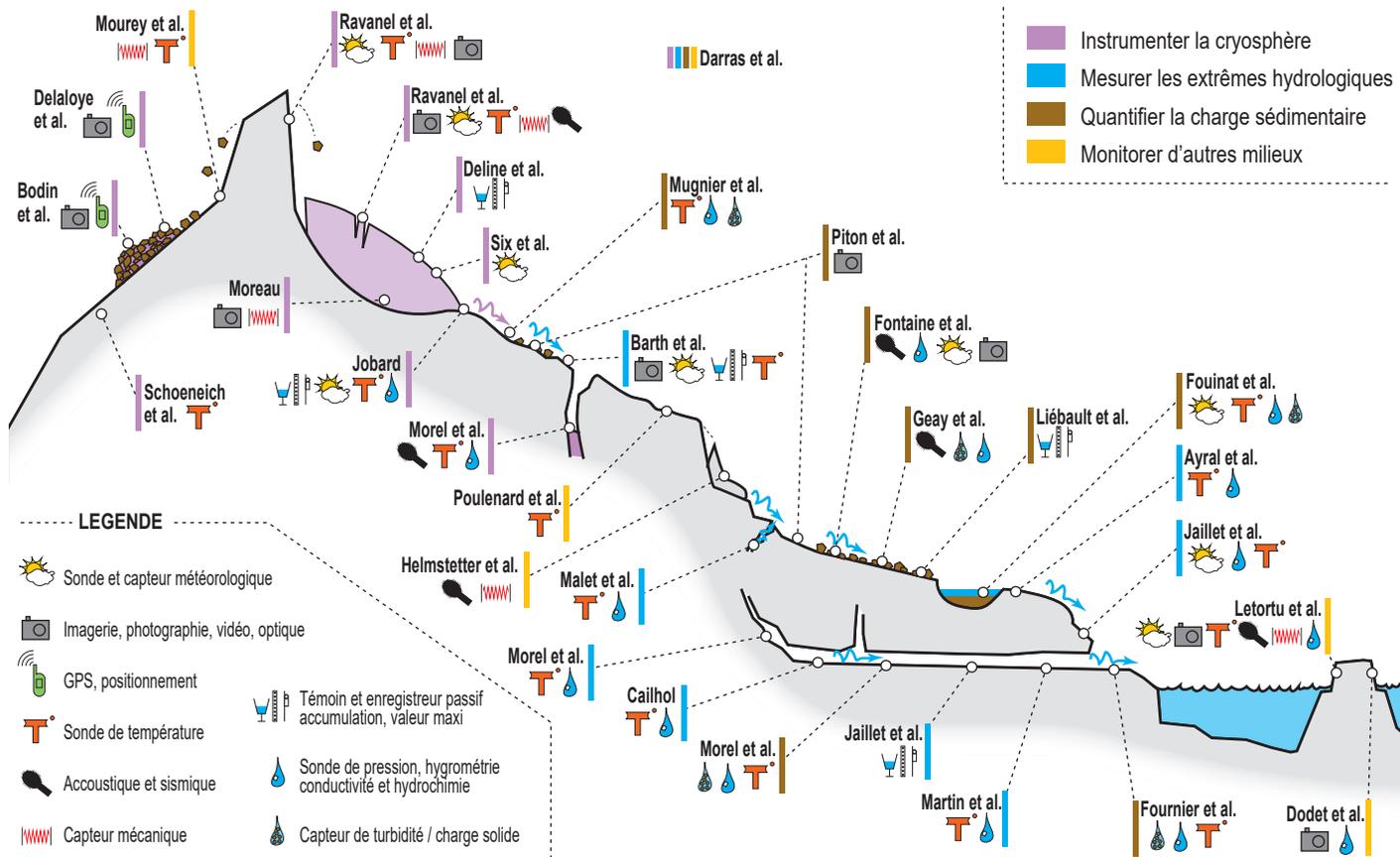


Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 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 (Marguareis, 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 Bilborupt 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, ADELIN 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 |



MESURES DE VAGUES EXTRÊMES LE LONG DE FALAISES ROCHEUSES ESCARPÉES ÎLE DE BANNEG, ARCHIPEL DE MOLÈNE, BRETAGNE

EXTREME WAVE MONITORING ON STEEP ROCKY CLIFFS: THE CASE OF BANNEG ISLAND (ARCHIPELAGO OF MOLÈNE, BRITTANY)

GUILLAUME DODET¹, FABIEN LECKLER², MICHEL OUTRÉ², RONAN AUTRET¹,
FRANCE FLOC'H³, NICOLAS LE DANTEC^{4,3}, SERGE SUANEZ¹

¹Université de Bretagne Occidentale, CNRS, UMR LETG 6554, IUEM, Technopôle Brest-Iroise, 29280 Plouzané.

²SHOM-Brest, Département recherche, 29200 Brest.

³Université Bretagne Occidentale, CNRS, UMR LGO 6538, IUEM, Technopôle Brest-Iroise, 29280 Plouzané.

⁴Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, DTecEMF, 29280 Plouzané.

Contact : guillaume.dodet@univ-brest.fr

RÉSUMÉ

L'étude des vagues en zone littorale est primordiale pour l'aménagement du littoral, la planification spatiale marine, la gestion du risque côtier ou encore la compréhension de la géomorphologie du littoral. Parmi les dispositifs existants pour mesurer les paramètres de vagues à la côte, le déploiement de capteurs de pression en zone intertidale représente une solution simple à mettre en œuvre, peu onéreuse et faiblement consommatrice d'énergie. Ce dispositif, très largement utilisé pour étudier l'hydrodynamique des plages sableuses, reste peu usité dans le cas des falaises rocheuses escarpées où le déferlement des vagues peut s'avérer extrêmement énergétique. L'instrumentation de ces environnements doit donc pouvoir résister à ces conditions extrêmes. Dans cette étude nous présentons un dispositif de mesures reposant sur des capteurs de pression, déployé sur l'île de Banneg, dans l'archipel de Molène, durant quatre hivers consécutifs. Ce dispositif adapté à des environnements extrêmes permet une observation des vagues sur le long terme.

MOTS-CLÉS : VAGUES EXTRÊMES, CAPTEURS DE PRESSION, FALAISES ROCHEUSES, ÎLE DE BANNEG.

ABSTRACT

Investigating waves in the nearshore zone is of key importance for coastal management, marine spatial planning, coastal risk mitigation and also for the understanding of coastal geomorphology. Among the existing systems to measure wave parameters in the nearshore, the deployment of pressure sensors in the intertidal zone is an easy, low cost and energy-efficient solution. This solution extensively used to investigate the hydrodynamics of sandy beaches, has been less used in the case of steep rocky cliffs where the breaking process can be extremely energetic. Hence, the instruments deployed in such environments need to be able to resist extreme conditions. In this study, we present the pressure-sensor based measurement of wave parameters deployed on Banneg Island, in the Molène archipelago, during four consecutive winters. This system is adequate for extreme wave conditions and can be used for long-term monitoring.

KEYWORDS: EXTREME WAVES, PRESSURE SENSORS, ROCKY CLIFFS, BANNEG ISLAND

INTRODUCTION

Les premières mesures de vagues en zone côtière à l'aide de capteurs de pression remontent à la fin des années 1940 (Siewell, 1948 ; Folsom, 1949). Malgré les limites de la théorie linéaire pour estimer la fonction de transfert entre les variations de pression au fond et les mouvements de la surface libre, en zone côtière (Draper, 1957 ; Cavaleri, 1980), les hauteurs de vagues estimées à l'aide de capteurs de pression ne

s'écartent généralement pas au-delà de 5 % de la valeur réelle (Bishop et Donelan, 1987). Ainsi, étant donné leur précision, leur faible consommation d'énergie et leur simplicité de déploiement, les capteurs de pression sont des instruments particulièrement adaptés à la mesure des vagues sur le littoral (Ruessink, 1998 ; Dodet et *al.*, 2013). Pourtant, la grande majorité des études portant sur la mesure des conditions hydrody-

namiques côtières, et notamment l'impact des vagues sur le littoral, concerne les environnements sableux ; relativement peu se sont intéressées à la mesure des vagues au niveau des côtes rocheuses, et notamment le long de falaises très escarpées. Dans cette étude, nous présentons un dispositif expérimental déployé le long des falaises rocheuses occidentales de l'île de Banneg (archipel de Molène, dans le Finistère), permettant de réaliser des mesures de vagues en zone peu profonde. La problématique est de mettre en place un système d'observation adapté au suivi longue durée

et capable de résister aux vagues les plus violentes. Ce suivi s'inscrit dans le cadre du projet PROTEVS (Prévision Océanique, Turbidité, Ecoulement, Vagues et Sédimentologie) financé par la Direction Générale de l'Armement, dont l'objectif est d'analyser les phénomènes de *setup* et de *runup* en environnement extrême. Il s'inscrit également dans un projet de recherche doctorale visant à analyser l'action des forçages hydrodynamiques dans les processus morpho-dynamiques des dépôts de forte énergie sur l'île de Banneg (Autret et al., 2016).

L'ÎLE DE BANNEG

L'île de Banneg se situe dans la partie septentrionale de l'archipel de Molène en mer d'Iroise (Figure 1A). Situé au large de la côte nord-ouest de la Bretagne, cet archipel est composé de 18 îles et îlots végétalisés et de nombreux écueils dont la partie terrestre forme les points émergés d'un vaste plateau sous-marin, essentiellement rocheux, d'une superficie atteignant 15 286 ha entre 0 et +25 m NGF (Guilcher, 1959 ; Hallégouët, 1982 ; Ehrhold et al., 2017). L'île de Banneg se distingue des autres îlots par sa situation exposée en bordure du profond chenal du Fromveur

qui sépare l'archipel de l'île d'Ouessant (Figure 1A). Son originalité réside dans la dissymétrie entre sa côte orientale abritée, principalement constituée de formes d'accumulation, et sa côte occidentale, exposée à la houle, entaillée en falaises plus ou moins verticales qui culminent entre 10 et 14 m d'altitude NGF (Figure 1B). Les mesures de houles effectuées au large d'Ouessant par la bouée-phare BEAIII sur la période 1985-2001 et les données simulées d'état de mer au large d'Ouessant entre 1979 et 2002 (Figure 1A) indiquent une prédominance des houles les plus énergiques de secteur ouest à nord-ouest (270° à 310°), qui représentent 60 % du régime annuel. La hauteur significative modale des houles est comprise entre 2 et 2,5 m (Fichaut et Suanez, 2008). Les hauteurs maximales les plus fréquentes atteignent les 3 m, mais peuvent atteindre 23,5 m, comme celles enregistrées lors de la tempête Petra du 4-5 février 2014 (Autret et al., 2016).

Le recul de la falaise occidentale de Banneg se traduit par le débitage de dalles rocheuses qui s'accumulent sous la forme d'amas de blocs au sommet de l'île (Fichaut et Suanez, 2011). Ces dépôts de forte énergie appelés blocs cyclopéens (Fichaut et Suanez, 2008), ou CTSD (*Cliff-Top Storm Deposit*, Suanez et al., 2009) présentent un intérêt morphodynamique original à l'échelle du bassin nord Atlantique. C'est dans le but d'analyser l'action des forçages hydrodynamiques, dans les processus d'arrachement, de transport et de déposition de ces blocs, que des mesures de la houle à la côte le long de falaise occidentale de l'île de Banneg sont réalisées depuis 2008 (Sheremet et al., 2014 ; Autret et al., 2016).

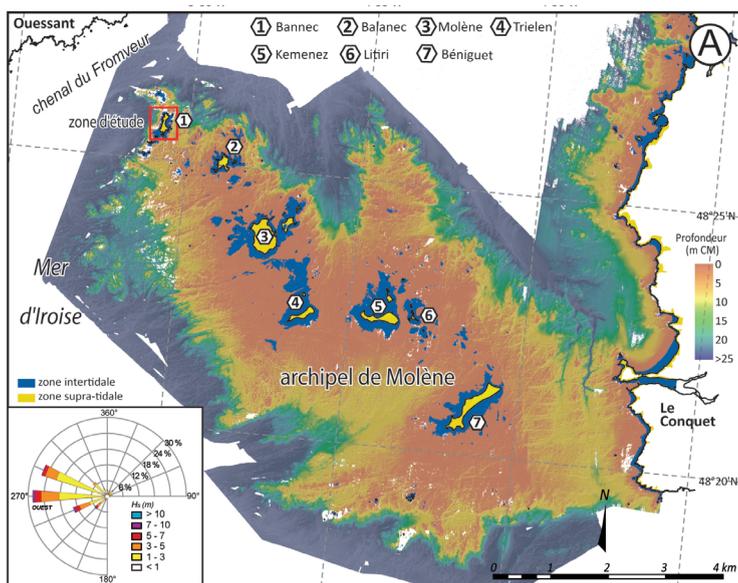


Figure 1 - Carte de localisation : A) carte topo-bathymétrique de l'archipel de Molène issu du modèle numérique altimétrique de référence continu terre-mer Litto3D® (la rose des houles a été réalisée à partir des données simulées d'état de mer au large d'Ouessant ; © Atlas Numérique de houle 1979-2002, LNHE) ; B) vue aérienne oblique de l'île de Banneg (cliché L. Brigand du 25/07/2009).

MÉTHODES

Le suivi des paramètres de vagues est réalisé à l'aide de capteurs de pression (Ocean Sensor System, OSSI-010-003C). Ces capteurs sont déployés dans toute la zone intertidale, du niveau des plus basses mers de vives-eaux au sommet des falaises (Figure 2E et 2F). Les capteurs sont fixés dans des supports en inox maintenus par des colliers de serrage (Figure 2C et 2D). Ces supports sont eux-mêmes fixés au sol à l'aide d'écrous vissés sur quatre tiges filetées, préalablement scellées dans la roche (Figure 2A et 2B). Le scellement des tiges filetées est assuré par une résine résistant aux conditions salines. D'un point de vue logistique, il est nécessaire de prévoir au moins deux cycles de marée consécutifs pour réaliser le déploiement complet du système de mesure (fixation des tiges et installation des supports). En utilisant un pack de 12 piles Lithium-Ion 18 V, un capteur a suffisamment d'autonomie pour enregistrer des mesures de pression pendant une période de quatre mois, avec une fréquence d'échantillonnage de 5 Hz. Ainsi, les opérations de maintenance d'un tel dispositif de monitoring consistent essentiellement à venir remplacer les batteries et la carte mémoire deux à trois fois par an.

Une fois les données collectées, l'estimation des paramètres de vagues se fait par analyse spectrale du signal de pression. Dans un premier temps, il est nécessaire de corriger le signal brut de la pression atmosphérique, car la pression mesurée par le capteur correspond à la somme de la pression atmosphérique au niveau de la mer et de la pression exercée par la colonne d'eau sur la cellule du capteur. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé les données barométriques

issues de la station météorologique du Stiff sur l'île d'Ouessant (Figure 1). Une fois la pression atmosphérique retranchée à la pression totale, une analyse de Fourier est réalisée sur des segments de 20 minutes, auxquels nous avons retiré la tendance liée à la marée. Afin de réduire le bruit et les fuites spectrales, une méthode de Welch (décomposition en sous-segments avec recouvrement à 50 %) est employée avec un fenêtrage de Hann. Le spectre obtenu à partir du signal de pression au fond ($E_p(f)$) permet ensuite de calculer le spectre d'élévation de la surface libre $E(f)$ en corrigeant le signal des effets non-hydrostatiques à partir de la théorie linéaire :

$$E(f) = E_p(f)[\rho_w g \cosh(kD)]^2$$

où ρ_w est la densité de l'eau, g la constante d'accélération gravitationnelle, k le nombre d'onde et D la profondeur du capteur.

Les paramètres moyens de hauteurs significatives (H_{m0}) et de périodes ($T_{m0,p}$) de vagues sont ensuite calculés à partir des moments spectraux m_p :

$$m_p = \int_0^{f_{\max}} f^p E(f) df$$

selon les relations :

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad \text{pour la hauteur des vagues, et}$$

$$T_{m0,p} = \left(\frac{m_p}{m_0}\right)^{-1/p} \quad \text{pour la période des vagues.}$$

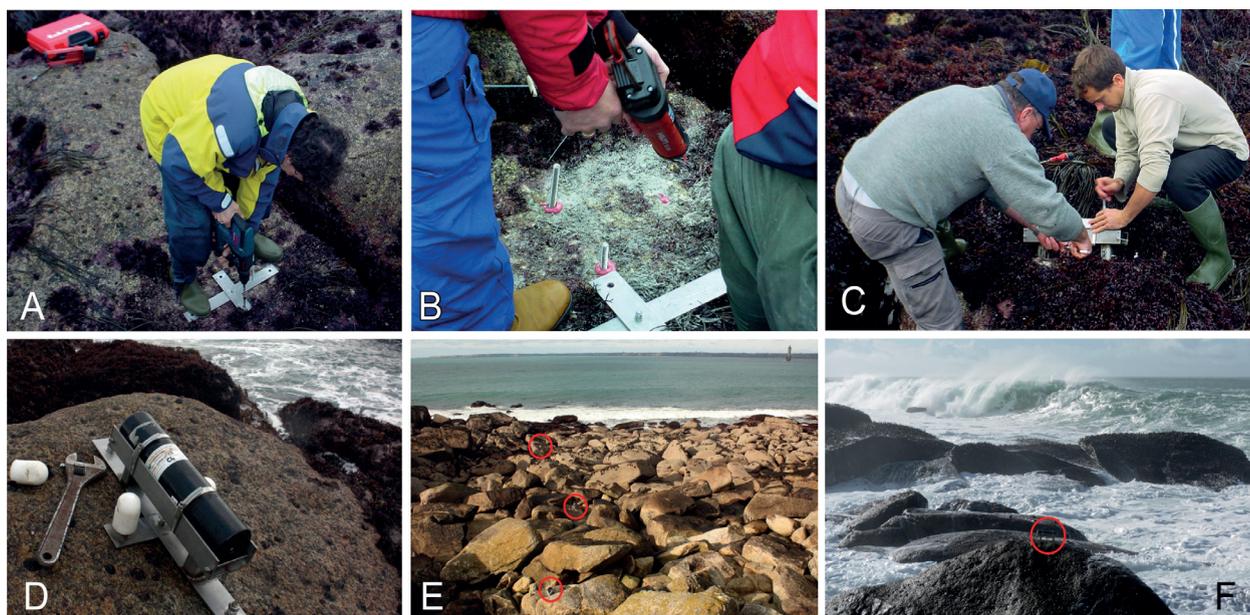


Figure 2 - Installation des capteurs de pression sur l'île de Banneg. A) Perçage de la roche. B) Fixation à la résine des tiges filetées. C) Fixation du support en inox. D) Capteur de pression monté dans son support en inox. E) Déploiement de 3 capteurs le long d'un profil du bas d'estran vers le haut de falaise. F) Conditions extrêmes en bas d'estran.

RETOUR D'EXPÉRIENCE

Le dispositif de suivi décrit ci-dessus a permis de réaliser des mesures de paramètres de vagues durant quatre hivers consécutifs (entre 2012 et 2016) dans un environnement rocheux particulièrement exposé aux houles océaniques. Durant l'hiver 2013-2014 particulièrement morphogène à l'échelle de tout le bassin nord Atlantique (Masselink *et al.*, 2016), des vagues de hauteurs significatives atteignant 5 m (Figure 3) ont été mesurées à moins d'une cinquantaine de mètres du rivage. Ces observations ont constitué un jeu de données unique pour l'étude de la dynamique des vagues extrêmes en zone littorale. La méthode employée présente toutefois quelques limites. D'une part, le dépla-

cement des blocs présents sur l'estran lors des plus fortes tempêtes peut détériorer les capteurs (Figure 4). D'autre part, les mesures ont quelques fois présenté des valeurs aberrantes suggérant une contribution non négligeable d'effets dynamiques liés à la présence de forts courants de fond lors du passage de fortes vagues (Figure 5). Plusieurs solutions ont été envisagées afin d'atténuer ces effets, telles que l'utilisation d'une grille de protection au niveau de la cellule du capteur ou encore le positionnement de ces derniers au fond d'anfractuosités présentes dans le substrat rocheux. Ces solutions n'ont pas été totalement efficaces et nécessitent d'être approfondies en laboratoire.

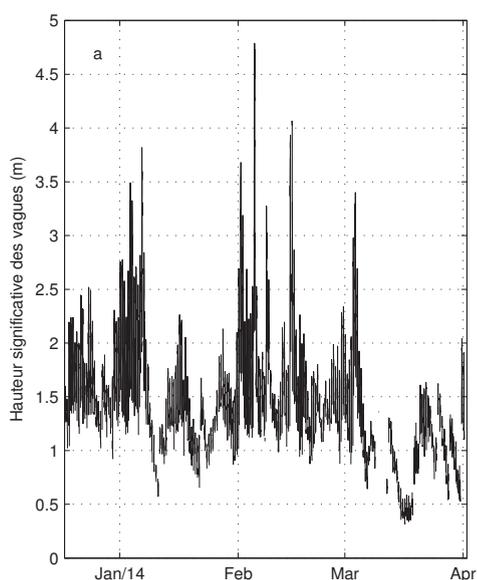


Figure 3 - Série temporelle des hauteurs significatives de vagues entre décembre 2013 et avril 2014 obtenue par analyse spectrale des mesures de pression.

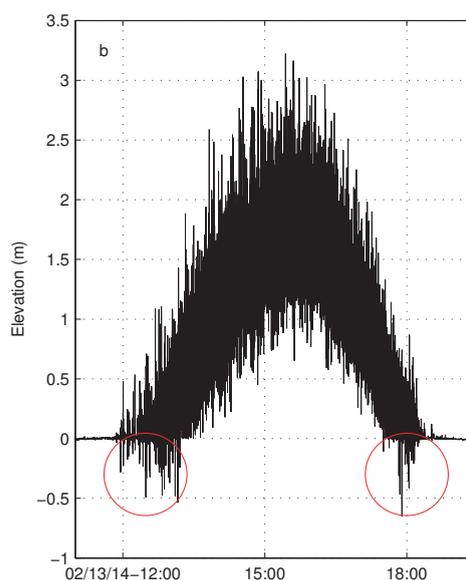


Figure 5 - Série temporelle d'élévation de la surface libre durant un cycle de marée, estimée à partir des mesures de pression. Les valeurs négatives (encerclées en rouge) sont liées aux effets de pression dynamique induits par les courants.



Figure 4 - Endommagement des capteurs durant l'hiver 2013/2014. A) Blocs de plusieurs tonnes arrachés et/ou déplacés. B) et C) Capteurs écrasés et/ou endommagés par la projection de blocs.



Submersion du cordon dunaire de la baie d'Audierne, au niveau de l'étang de Trunel, lors de la tempête Petra du 5 février 2014.

(Photo © Philip Plisson
www.photo.plisson.com)



Côte rocheuse nord-ouest de l'île de Ouessant battue par les vagues lors de la tempête Petra du 5 février 2014, avec le phare du Creac'h au premier plan.

(Photo © Philip Plisson
www.photo.plisson.com)



Franchissement de la digue du port du Conquet (Finistère), lors de la tempête Petra du 5 février 2014.

(Photo © Philip Plisson
www.photo.plisson.com)



Falaise occidentale de Banneg : prise de vue réalisées le 12 février 2016 à 9h, à l'aide d'une caméra, montée sur un support scellé dans la roche surplombant la falaise.

CONCLUSION

Malgré les contraintes en matière d'accessibilité (falaises rocheuses escarpées) et la logistique complexe pour le déploiement de ces instruments (perçage et fixation de supports en inox), l'utilisation de capteurs de pression s'avère très utile pour la mesure des paramètres de vagues dans ces environnements extrêmes. Ce dispositif a notamment permis de suivre et d'analyser les conditions hydrodynamiques extrêmes de l'hiver 2013-2014, durant lequel l'île a été submergée à plusieurs reprises, entraînant l'arrachage et le déplacement de nombreux blocs (Autret et *al.*, 2016). De plus, les faibles contraintes en matière de maintenance (remplacement des batteries tous les 4 mois) sont propices

à un suivi pluriannuel si les instruments ne sont pas détériorés. Comme le montre la Figure 2E, le déploiement de plusieurs capteurs le long d'un profil permet de mesurer la déformation des vagues du bas d'éstran jusqu'au sommet des falaises. Pour autant, les phénomènes hydrodynamiques intervenant dans la zone de swash après le déferlement des vagues (extension du jet de rive, action de la nappe de retrait, etc.) échappent à cette observation. Aussi, la solution envisagée pour le futur est de coupler ces mesures hydrostatiques avec de l'observation par caméra vidéo centrée sur toute la zone, de celle de la déformation des vagues à celle du déferlement.

Remerciements

Nous remercions très chaleureusement la Réserve Naturelle d'Iroise et ses agents, Hélène Mahéo et David Bourlès, pour nous avoir permis de réaliser ces mesures, et nous avoir aidés à installer et récupérer les instruments. Le déploiement des capteurs de pression sur l'île de Banneg a été financé par le SHOM dans le cadre du PEA PROTEVS (12CR6). Ce travail a aussi bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissement d'avenir » portant la référence ANR-10-LABX-19-01. Nous remercions Philip Plisson pour l'autorisation d'utiliser ses photographies aériennes prises lors de la tempête Petra du 14 février 2014.

BIBLIOGRAPHIE

- AUTRET R., DODET G., FICHAUT B., SUANEZ S., DAVID L., LECKLER F., ARDHUIN F., AMMANN J., GRANDJEAN P., ALLEMAND P., FILIPOT J.F., 2016. A comprehensive hydro-geomorphic study of cliff-top storm deposits on Banneg Island during winter 2013-2014. *Marine Geology*, 382, 37-55.
- BISHOP C.T., DONELAN M.A., 1987. Measuring waves with pressure transducers. *Coastal Engineering*, 11, 309-328.
- CAVALERI L., 1980. Wave measurement using pressure transducer. *Oceanologica Acta*, 3, 339-346.
- DODET G., BERTIN X., BRUNEAU N., FORTUNATO A.B., NAHON A., ROLAND A., 2013. Wave-current interactions in a wave-dominated tidal inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 1587-1605.
- DRAPER L., 1957. L'atténuation de la houle en fonction de la profondeur. *La Houille Blanche*, 6, 926-931.
- EHRHOLD A., LE GALL B., STEPHAN P., SUANEZ S., 2017. Présentation générale. In: Ehrhold A., Le Gall B., Atlas de l'archipel de Molène, Géologie, géomorphologie et sédimentologie, Quae, Versailles, 17-32.
- FICHAUT B., SUANEZ S., 2008. Les blocs cyclopéens de l'île de Banneg (archipel de Molène, Finistère) : accumulations supratidales de forte énergie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 14, 15-31.
- FICHAUT B., SUANEZ S., 2011. Quarrying, transport and deposition of cliff-top storm deposits during extreme events: Banneg Island, Brittany. *Marine Geology*, 283, 36-55.
- FOLSOM R.G., 1949. Measurement of ocean waves. *Eos Trans. AGU*, 30, 691-699.
- GUILCHER A., 1959. L'archipel de Molène (Finistère). Etude morphologique. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, II-2, 81-86.
- HALLÉGOÛËT B., 1982. L'archipel de Molène. *Penn ar Bed*, 110, 79-82.
- MASSELINK G., CASTELLE B., SCOTT T., DODET G., SUANEZ S., JACKSON D., FLOC'H F., 2016. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. *Geophysical Research Letter*, 2015GL067492.
- RUSSINK B.G., 1998. Bound and free infragravity waves in the nearshore zone under breaking and nonbreaking conditions. *Journal of Geophysical Research*, 103, 12795-12805.
- SHEREMET A., STAPLES T., ARDHUIN F., SUANEZ S., FICHAUT B., 2014. Observations of large infragravity wave runup at Banneg Island, France. *Geophysical Research Letters*, 41, 976-982.
- SIEWELL H.R., 1948. Evaluation of sea-surface roughness from underwater-pressure recordings. *Eos Trans. AGU*, 29, 197-201.
- SUANEZ S., FICHAUT B., MAGNE R., 2009. Cliff-top storm deposits on Banneg Island, Brittany, France: effects of giant waves in the Eastern Atlantic Ocean. *Sedimentary Geology*, 220, 12-28.