

Impacts des vagues et de la circulation d'eau sur la microfracturation des falaises rocheuses : mise en place d'un suivi multiparamètre en Bretagne

P. Letortu¹, K. Laute¹, N. Le Dantec^{2,3}, E. Augereau², J. Ammann², C. Prunier², A. Hénaff¹, L. David¹, A. Maulpoix¹, V. Cuq¹, M. Jaud², B. Le Gall², C. Delacourt²

¹ Université de Bretagne Occidentale, IUEM, CNRS, UMR LETG, Technopôle Brest-Iroise, rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France (pauline.letortu@univ-brest.fr)

² Université de Bretagne Occidentale, IUEM, CNRS, UMR Géosciences Océan, Technopôle Brest-Iroise, rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France

³ CEREMA—Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, DTecEMF/ER, rue Bouguer, 29280 Plouzané, France

RÉSUMÉ

Pour mieux comprendre les agents et les processus qui contrôlent l'érosion et le recul des côtes rocheuses, un suivi multiparamètre à haute fréquence a été mis en place entre février et mai 2017 sur les falaises de *Porsmilin* (Plougonvelin, Finistère, Bretagne). Ce suivi a 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 d'améliorer la prévision/prévention de la rupture des falaises.

MOTS-CLÉS : falaises, microfracturation, impact des vagues, circulation d'eau interstitielle, érosion des côtes rocheuses, Bretagne

ABSTRACT

In order to gain new insights into the agents and processes controlling rocky coast erosion and retreat a high frequency and multi-parameter monitoring field experiment is carried out from February until May 2017 in *Porsmilin* cliffs (Plougonvelin, Finistère, Brittany). This survey aims to discriminate the relative contributions of subaerial (e.g. groundwater infiltration, water-table variations) and marine (e.g. 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, hard rock coast 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 prépondérants dans l'altération (notamment les précipitations...) et les actions marines ne constituent qu'un agent de transport et de déblaiement (par exemple Brossard et Duperret, 2004 ; 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. Cependant, 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, 2010) et sur le terrain par des mesures sismiques et/ou acoustiques (Adams et al., 2002 ; Senfaute et al., 2009 ; Young et al., 2012 ; Earlie et al., 2015) ou 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 :

- 1) les données à haute résolution (spatiale et temporelle) et 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 ;
- 2) 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... ;
- 3) le contexte morphostructural et environnemental propre à chaque site complique l'identification du/des facteur(s) déclenchant(s) et la transposition des résultats d'un site à un autre.

La mise en place d'une instrumentation multiparamètre *in situ* et à haute fréquence permettrait de répondre à la problématique suivante : quels rôles respectifs jouent l'impact des vagues et la circulation d'eau interstitielle dans l'évolution de la microfracturation des falaises ? La réponse est déterminante pour la prévision/prévention du déclenchement des mouvements gravitaires.

INSTRUMENTATION

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 (<https://www-ium.univ-brest.fr/observatoire/observation-cotiere>) et du Service National d'Observation Dynalit (<https://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 (à l'est et à l'ouest). 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 1) principalement de la forte altération des

roches et l'existence de nombreuses failles et diaclases, 2) 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 météo-marines 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, CCPI¹) (figure 1).

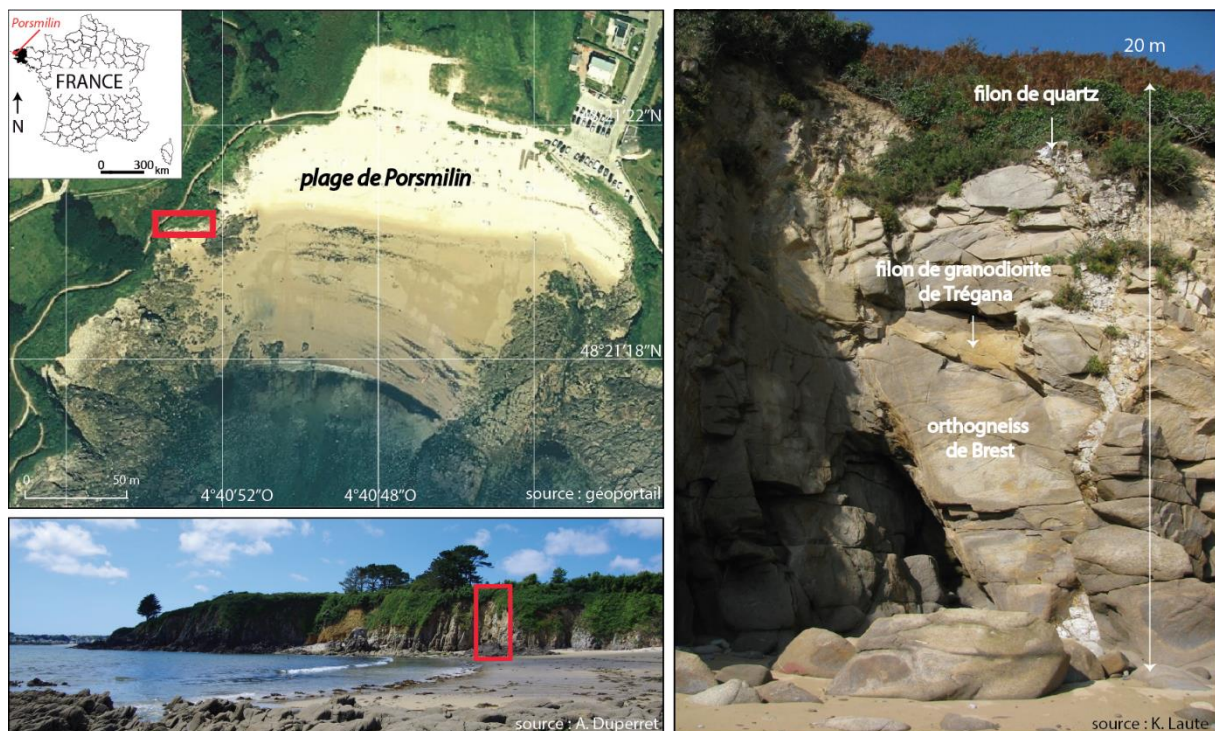


Figure 1 : Localisation de la falaise instrumentée à Porsmilin (Plougonvelin, Finistère)

Instrumentation multiparamètre *in situ* et à haute fréquence

L'instrumentation de la falaise de *Porsmilin* (figure 2 et tableau 1), entre février et mai 2017, consiste en un suivi (Laute et al., 2017) :

1) de la microfracturation à l'échelle du front de falaise avec quatre géophones, deux

extensomètres, deux inclinomètres et 20 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) et un géophone vertical est

¹ Communauté de Communes du Pays d'Iroise, compteur installé à la batterie de Toul Logot entre le 1^{er} mai 2014 et le 30 avril 2015.

localisé en haut de falaise (à 1 m de profondeur dans le sol). Cette configuration devrait permettre de mesurer l'évolution de la microfracturation dans l'espace et dans le temps. Ainsi, les périodes de forte concentration de signaux électro-acoustiques seront 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...). A 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 est réalisé par les fissuromètres, les deux extensomètres et les deux inclinomètres.

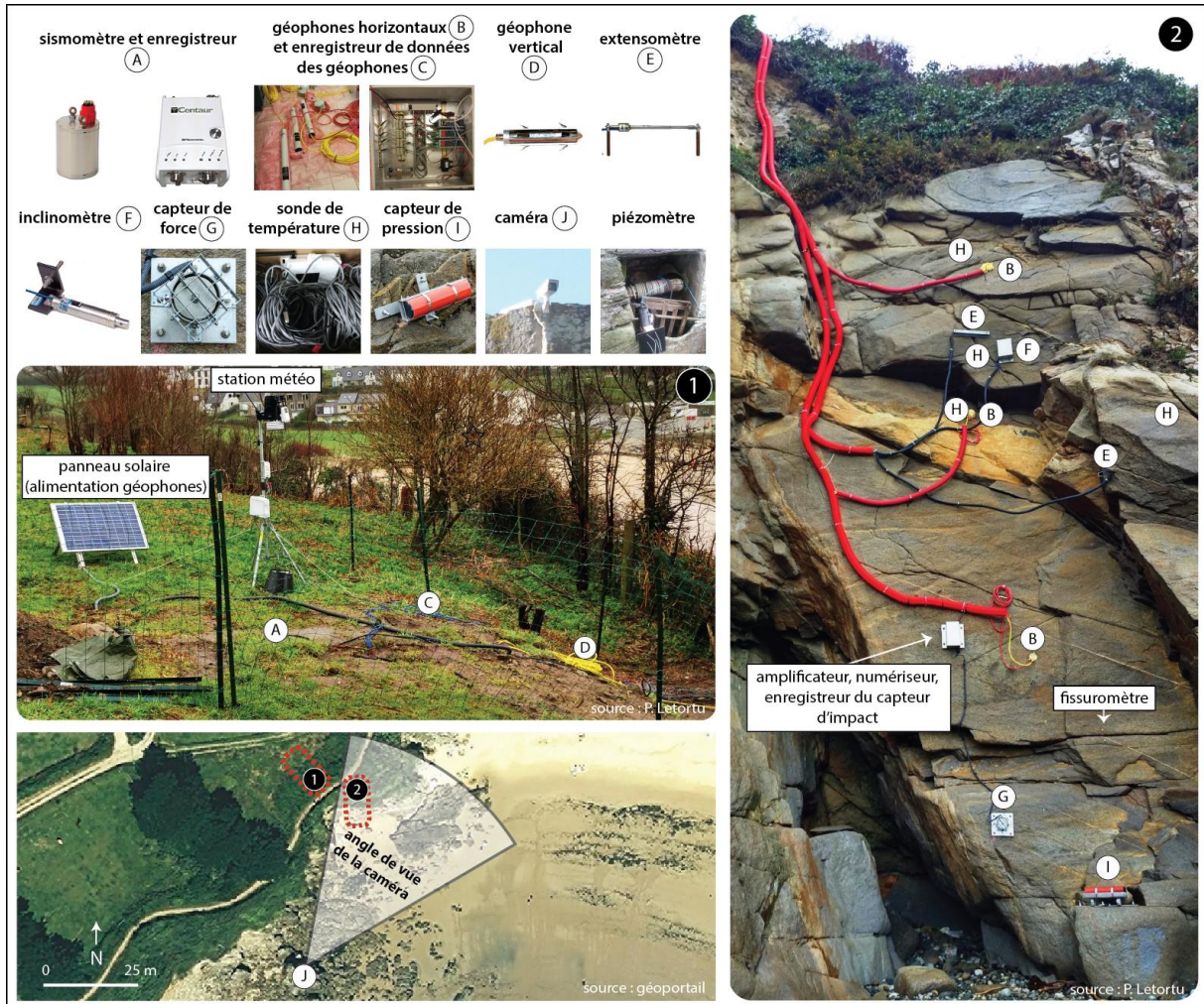


Figure 2 : Environnement de l'instrumentation et présentation du matériel utilisé

Thématique	Instrument	Quantité	Localisation	Modèle (marque)	Caractéristiques d'acquisition des données
Microfracturation	Géophone (massif rocheux)	3	Front de falaise	Horizontal, triaxial, 4,5 Hz (IMS)	4,5-100 Hz (déclenché à chaque événement)
	Extensomètre	2	Front de falaise	4420 VW, intervalle 1-25 mm (1") (Geokon)	Horaire
	Inclinomètre	2	Front de falaise	6350 VW, uniaxial (Geokon)	Horaire
	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)
Forçages marins	Capteur de force	1	Front de falaise	FN9620-M-10KN (TE connectivity)	1 kHz, déclenché lorsque les vagues atteignent le capteur
	Sismomètre	1	Haut de falaise	Trillium Compact Posthole (Nanometrics)	0,01-100 Hz
	Capteur de pression	4	Estran	Wave gauge (OSSl)	10 Hz
	Acquisition optique	1	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 minutes à chaque marée basse
Forçages continentaux	Sonde de température	4	Front de falaise	Sonde de température en acier inoxydable avec terminaison bifilaire, Vantage Pro 2	Horaire
	Station météorologique	1	Haut de falaise	Vantage Pro 2 (Davis)	Horaire
	Piézomètre	1	Haut de falaise	CNR10R (Panatronic)	Horaire

Tableau 1 : Instruments utilisés et caractéristiques d'acquisition des données

2) 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 permettra 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 sera quantifiée grâce au système d'acquisition vidéo. 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) seront quantifiés respectivement par le capteur de force (disposé en pied de falaise) et le sismomètre à large bande (positionné en haut de falaise). Le premier quantifiera l'énergie dissipée lors de l'impact des vagues en pied de falaise. Le second fournira les déplacements micrométriques enregistrés en haut de falaise. Le couplage sismomètre/géophones/caméra permettra de connaître la réponse mécanique

de la falaise et de visualiser la rupture en temps réel, le cas échéant.

3) 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 équipée de capteurs distants mesurant la température du front de falaise. En complément des données disponibles dans les communes voisines (www.ades.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 sont 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). Celles-ci pourront renseigner sur les variations thermiques du front de falaise en fonction de l'albédo (qui dépend de la lithologie) qui pourraient favoriser la thermoclastie.

CONCLUSION

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

mieux comprendre l'érosion et le 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.

BIBLIOGRAPHIE

Adams P.N., Anderson R.S., Revenaugh J., 2002. Microseismic measurement of wave-energy delivery to a rocky coast, *Geology*, 30, 895–898.

Brossard J., Duperret A., 2004. Coastal chalk cliff erosion: experimental investigation on the role of marine factors. In : Mortimore R.N., Duperret A. (eds), *Coastal Chalk Cliff Instability*, Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 20, 109-120

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. 325 p. Habilitation à Diriger les Recherches, Géographie, Brest.

Dehouck 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., Cnudde 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.

Earlie C.S., Young A.P., Masselink G., Russell P.E., 2015. Coastal cliff ground motions and response to extreme storm waves. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 847–854. doi: 10.1002/2014GL062534

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., Arduin 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* Vol. 19, EGU 2017-3721, 2017.

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.

McGreal W.S., 1979. Marine erosion of glacial sediments from a low-energy cliffline environment near Kilkeel, Northern Ireland. *Marine Geology*, 32(1), 89-103.

Pierre, G., Lahousse, P., 2006. The role of groundwater in cliff instability: An example at Cape Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France). *Earth Surf. Processes Landf.*, 31, 31–45. doi: 10.1002/esp.1229

Senfaute, G., Duperret, A., Lawrence, J.A., 2009. Micro-seismic precursory cracks prior to rock-fall on coastal chalk cliffs: A case study at Mesnil-Val, Normandie, NW France. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1625–1641.

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.

Trenhaile, A.S., 2010. The effect of Holocene changes in relative sea level on the morphology of rocky coasts. *Geomorphology*, 114, 30–41. doi:10.1016/j.geomorph.2009.02.003

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