



ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT ET PHYSIQUE DE L'UNIVERS, PARIS

ed560.stepup@u-paris.fr

**Titre du sujet : Quantification de la perte de masse liée au vêlage d'icebergs en région polaire
par une approche couplée modélisation numérique et sismologie**

Directeur (trice) : **MANGENEY Anne, PRCE Université Paris Cité**, mangeney@ipgp.fr

Co-directeur (trice) / Co-encadrant(e) : **LEROYER Alban, LHEEA, Ecole Centrale de Nantes**, alban.leroyer@ec-nantes.fr

IPGP- Equipe de sismologie – UMR7154

Financement : **Contrat doctoral avec ou sans mission d'enseignement**

Développement du sujet :

Contexte scientifique : Une des questions principales liée au changement climatique est l'amélioration de la précision des prédictions de la hausse du niveau des mers. En particulier, les incertitudes dépendent de la quantification de la perte de masse des calottes polaires comme celle du Groenland. Le détachement d'icebergs au front des glaciers côtiers du Groenland représente jusqu'à la moitié des pertes de masses aux terminus de ces glaciers. Certains icebergs qui se détachent des glaciers sont fins et ont une hauteur de l'ordre du kilomètre, ils sont donc instables et se retournent lors du vêlage. L'action de contact iceberg/glacier et le champ de pression généré par l'écoulement de l'eau exercent ainsi une force sur le glacier qui crée un signal sismique enregistré par des stations situées à des centaines de km de la source. Le nombre d'évènements de ce type a augmenté et leur distribution spatiale a évolué depuis les 30 dernières années (*Olsen et al, 2017, Sergeant et al. 2019*). Quantifier et localiser cette perte de masse est fondamental pour évaluer la réponse des glaciers au changement climatique.

Les séismes glaciaires, associés au retournement d'icebergs très volumineux ($\sim \text{km}^3$), ont des magnitudes comprises entre 4.6 et 5.2 et la plupart sont localisés au niveau des glaciers émissaires de la calotte groenlandaise (*Ekström et al., 2003, Tsai et al, 2008 ; Walter et al, 2012*). Le nombre croissant d'évènements sismiques détectés est corrélé à l'évolution du retrait des glaciers (*Ekström et al., 2006; Veitch and Nettles, 2012*). Une limitation de ces études est que seuls les séismes glaciaires de grande magnitude sont détectés. Nous avons récemment développé des techniques d'Intelligence Artificielle (IA) pour détecter des séismes de plus petite magnitude, augmentant significativement le catalogue d'évènements à analyser (*Pirot et al., 2024*).

La force de contact iceberg/glacier à l'origine des séismes glaciaires est supposée être quasi horizontale, normale au front de vêlage. Elle serait responsable d'un déplacement co-sismique du glacier (*Murray et al., 2015a*). En effet, quand un glacier perd de la masse à son terminus par vêlages d'icebergs, une accélération de son écoulement peut être observée (*Joughin et al, 2008, Nettles et al, 2008*). La comparaison entre les forces inversées à partir du signal sismique et les simulations numériques de retournement d'icebergs est un moyen unique de retrouver le volume des icebergs et ainsi de quantifier la perte de masse liée à ce processus (*Sergeant et al. 2018,2019*). Jusqu'à maintenant cette comparaison avait été faite en simplifiant de manière grossière les mouvements de l'océan lors du retournement des icebergs et donc le champ de pression associé (*Bonnet et al., 2020*). Cependant, nos travaux récents tendent à montrer que des compensations s'opèrent entre l'action de contact et le champ de pression généré sur le front du glacier qui remettent en question l'interprétation des sources des séismes glaciaires (*De Pinho Dias et al. 2025*). Des investigations supplémentaires s'avèrent donc nécessaires pour confirmer et approfondir ces résultats préliminaires.

Sujet de thèse : Cette thèse se déroulera dans le cadre d'une collaboration entre l'équipe de sismologie de l'IPGP, l'équipe METHRIC du LHEEA, et le Centre des Matériaux et le laboratoire PIMM, qui a été initiée pour utiliser les connaissances de pointe en CFD (Computational Fluid Dynamics) et en mécanique des

matériaux pour étudier les mécanismes physiques mis en jeu lors du retournement des icebergs et de la réponse du glacier à cette instabilité, ainsi que leurs liens avec les ondes sismiques générées. Plus précisément, il s'agira dans cette thèse de poursuivre deux directions qui ont été initiées dans les thèses de Sélima Wetter et de Nicolas De Pinho Dias : (i) l'exploitation d'un grand catalogue de séismes glaciaires détectés par IA et leur inversion pour retrouver les forces qui les ont générés et (ii) la simulation de ces forces à partir de modèles alliant mécanique des fluides et mécanique des solides simulant le retournement d'icebergs, la dynamique des mouvements de fluides associée et la réponse du glacier. Pour la partie (i) des méthodes déjà développées pourront être utilisées. Pour la partie (ii) il s'agira de développer un métamodèle basé sur une paramétrisation des résultats issus des simulations CFD haute-fidélité pour simuler un grand nombre de scénarii (différentes tailles d'icebergs, différents rapports d'aspects, différentes profondeurs de l'océan, etc.). En effet, les simulations haute-fidélité sont trop lourdes en temps de calcul pour échantillonner finement le champ des possibles. Ce métamodèle sera alors associé à l'inversion sismologique afin de quantifier de manière fine la perte de masse des glaciers mais aussi de mieux comprendre les phénomènes physiques en jeu lors d'un vélage d'iceberg. D'autre part, il s'agira de mettre en place une co-simulation entre le code CFD ISIS-CFD (Figure 1) et un code Eléments Finis d'écoulement du glacier (ELMER/ICE). Ce couplage devrait permettre de mieux appréhender la réponse du glacier lors d'un vélage typique d'un iceberg de grande taille. On s'intéressera notamment aux phénomènes au niveau du contact glacier/lit rocheux et à ce qu'ils peuvent nous apprendre sur la friction basale qui reste encore largement méconnue.

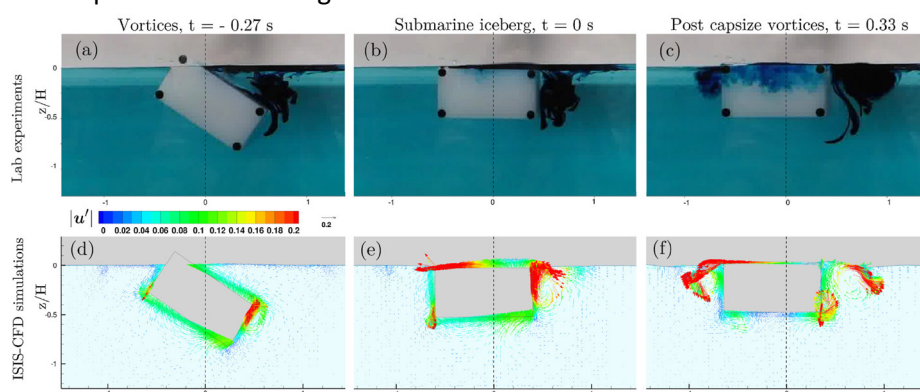


Figure 1. Vue de côté des expériences de laboratoire de *Burton et al. (2012)* (a, b, c); échelle de couleur représentant le champ de vitesse dans l'eau calculée avec le code fluide/structure ISIS-CFD (d, e, f), à trois instants. Figure issue de *Bonnet et al. (2020)*.

Profil recherché: Etudiant.e de Master 2, école d'ingénieur ou équivalent avec un bagage solide en **modélisation numérique, mécanique des fluides, ou mécanique des solides et en géophysique**. Les candidats devront être motivés par un travail multidisciplinaire à l'interface entre plusieurs équipes et disciplines.

Encadrement: Anne MANGENEY Anne, Professeure Université Paris Cité, mangeny@ipgp.fr; Alban LEROYER, Maître de Conférence Ecole Centrale de Nantes, alban.leroyer@ec-nantes.fr; Olivier CASTELNAU, Directeur de Recherche CNRS, ENSAM-Paris, olivier.castelnaud@ensam.eu.

Bibliographie

- Burton, J. C., Amundson, J. M., Abbot, D. S., Boghosian, A., Cathles, L. M., Correa-Legisos, S., Darnell, K. N., Guttenberg, N., Holland, D. M., MacAyeal, D. R. Laboratory investigations of iceberg capsizing dynamics, energy dissipation and tsunamigenesis. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(1), 1–13, (2012).
- Bonnet, P., Yastrebov, V. A., Queutey, P., Leroyer, A., Mangeny, A., Castelnaud, O., Sergeant, A., Stutzmann, E., and Montagner, J.P., 2020. Modelling iceberg capsizing in the open ocean, *Geophys. J. Int.*, 223,1265–1287.
- De Pinho Dias, N., Leroyer, A., Mangeny, A., Castelnaud, O. Fluid-structure simulations of large iceberg capsizing, submitted to *Ocean Engineering* (2025).
- Ekström, G., Nettles, M., and Abers, G. A. (2003). Glacial earthquakes. *Science*, 302(5645), 622–624.
- Ekström G (2006) Global detection and location of seismic sources by using surface waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96(4A), 1201–1212.
- Joughin, I., Howat, I. M., Fahnestock, M., Smith, B., Krabill, W., Alley, R. B., Stern, H., and Truffer, M. (2008). Continued evolution of Jakobshavn Isbræ following its rapid speedup. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 113(F4).
- Murray, T., Nettles, M., Selmes, N., Cathles, L., Burton, J., James, T., Edwards, S., Martin, I., O'Farrell, T., Aspey, R., et al. (2015a). Reverse glacier motion during iceberg calving and the cause of glacial earthquakes. *Science*, 349(6245), 305–308.

- Olsen, K. G., Nettles, M. Patterns in glacial-earthquake activity around Greenland, *Journal of Glaciology*, 63, 242, 1077–1089, (2017)
- Pirot, E., Hibert, C., Mangeney, A., 2024. Enhanced glacial earthquake catalogues with supervised machine learning for more comprehensive analysis, *GEOPHYS. J. INT.*, 236(2), 849-871.
- Sergeant, A., Yastrebov, V., Mangeney, A., Castelnau, O., Montagner, J.-P., and Stutzmann, E. (2018). Numerical modeling of the iceberg capsizing force responsible for glacial earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 123(11), 3013-3033.
- Sergeant, A., Mangeney, A., Yastrebov, V., Walter, F., Montagner, J. P., Castelnau, O., Stutzmann, E., Bonnet, P., Ralaarisoa, J. L., Bevan, S., and Luckman, A. 2019. Monitoring Greenland ice-sheet buoyancy-driven calving discharge using glacial earthquakes, *Annals of Glaciology*, 60(79), 75-95.
- Tsai, V. C., Rice, J. R., and Fahnstock, M. (2008). Possible mechanisms for glacial earthquakes, *J. Geophys. Res. Earth Surface*, 113 (F3).
- Veitch, S. A. and Nettles, M. (2012). Spatial and temporal variations in greenland glacial earthquake activity, 1993–2010, *J. Geophys. Res. Earth Surface*, 117 (F4).
- Walter, F., Amundson, J.M., O’Neel, S., Truffer, M., Fahnstock, M., and Fricker, H. A. (2012). Analysis of low-frequency seismic signals generated during a multiple-iceberg calving event at jakobshavn isbræ, Greenland, *J. Geophys. Res. Earth Surface*, 117 (F1).