

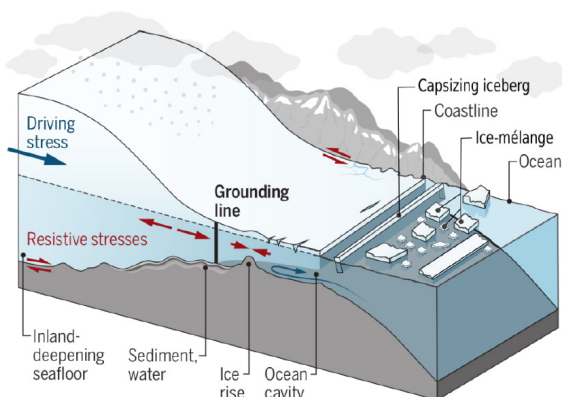
## Vers la surveillance du vêlage d'icebergs en région polaire par une approche couplée alliant modélisation fluide-structure et sismologie

**Développement du sujet et organisation du travail :** Une des questions fondamentales liées au changement climatique est la quantification de son impact sur les glaciers et les calottes polaires. Ces vingt dernières années, une accélération significative des vitesses d'écoulement et du retrait des glaciers côtiers est mesurée au Groenland (*Howatt et al.*, 2008). Quantifier et localiser la perte de masse des glaciers émissaires, due pour moitié au vêlage d'iceberg, est donc un enjeu majeur. Il existe d'autre part un lien fort, encore très mal compris, entre le vêlage d'icebergs et la dynamique des glaciers, le vêlage entraînant parfois une accélération significative de l'écoulement de la glace (*Joughin et al.*, 2008, *Nettles et al.*, 2008) (Figure 1). L'objectif de cette thèse est de faire une avancée décisive dans la quantification de l'évolution spatio-temporelle du vêlage d'icebergs en région polaire en associant des **simulations numériques en mécanique des fluides et des solides du vêlage d'iceberg et de la dynamique glaciaire** et des **méthodes d'inversion sismologiques**. La thèse proposée ici sera centrée sur la modélisation numérique (interaction fluide/structure).

Le signal sismique généré lors du vêlage d'icebergs, enregistré en continu, offre une opportunité unique pour suivre leur évolution. Ces séismes glaciaires ont des magnitudes comprises entre 4.6 et 5.2 (*Ekström et al.*, 2003). Ils sont enregistrés à des distances de plus de 100 km de la source, la plupart étant localisés au niveau des glaciers émissaires de la calotte groenlandaise. Ces séismes ont été associés au détachement d'icebergs très volumineux ( $\sim \text{km}^3$ , giga-tonne) qui, en se retournant, appliquent une force de plusieurs dizaines de giga-newtons sur le glacier (*Tsai et al.*, 2008 ; *Walter et al.*, 2012). Cette force serait responsable d'un déplacement co-sismique du glacier (*Murray et al.*, 2015). Nous avons récemment retrouvé les histoires des forces à l'origine des séismes glaciaires en inversant les formes d'ondes sismiques. A l'aide d'un modèle simplifié d'interaction iceberg-océan, nous avons calculé le volume et la position des icebergs en comparant un premier catalogue de forces simulées à la force inversée à partir des données sismiques (*Sergeant et al.*, 2018, 2019).

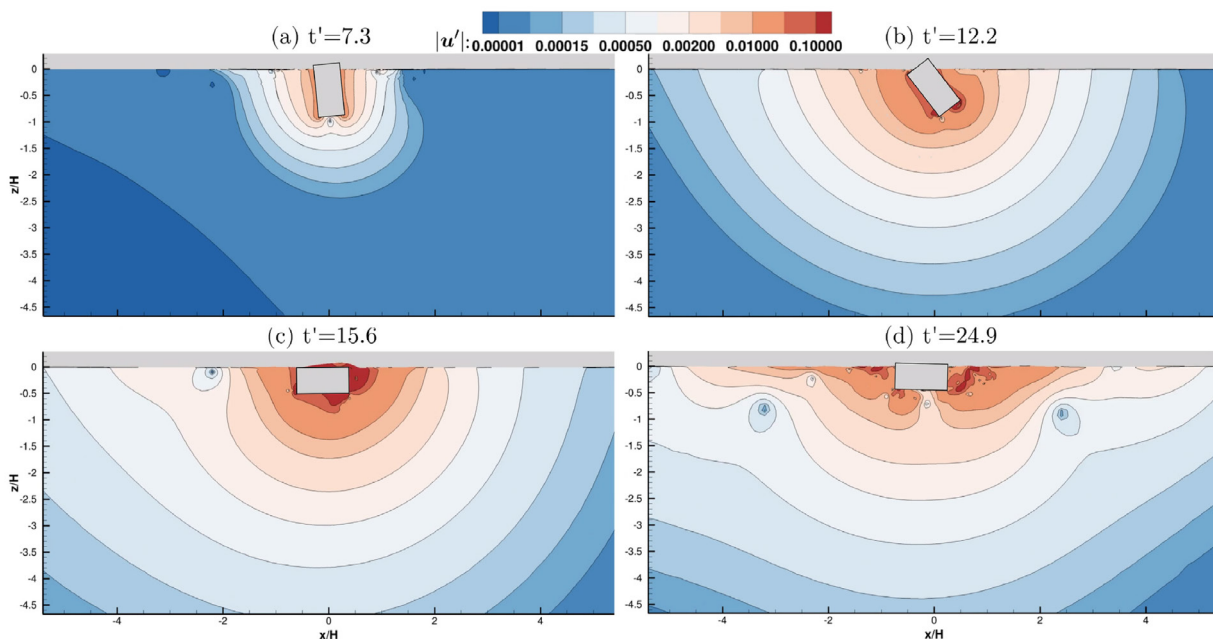
Une limitation majeure de cette première approche provient des approximations faites dans le couplage entre le mouvement de l'iceberg et celui de l'océan environnant. En collaboration avec le LHEEA, nous avons appliqué les développements numériques récents en dynamique des fluides à surface libre (Computational Fluid Dynamics, CFD) à la problématique du retournement d'icebergs (*Bonnet et al.*, 2020). Cette étude a montré que les **mouvements fluides à forte dynamique** générés par la rotation des icebergs peuvent impacter l'océan à plusieurs km de distance (Figure 2). D'autre part, des modélisations aux Eléments Finis de la réponse dynamique du glacier montrent que

ces mouvements fluides jouent un rôle important dans la réponse dynamique du glacier. **Le couplage entre la réponse mécanique de la glace solide, les mouvements océaniques et les ondes sismiques générées** n'a jusque-là été décrit que par des approches extrêmement simplifiées (*Murray et al.*, 2015). Développer un modèle couplé glacier-iceberg-océan-Terre solide est un moyen unique de quantifier précisément ces mouvements fluides, leur rôle dans la déstabilisation potentielle du glacier et leur contribution aux ondes sismiques générées lors du vêlage. C'est le travail proposé dans cette thèse.



**Figure 1.** Schématisation du front glaciaire et du vêlage d'icebergs en régions polaires.

Plus précisément, il s'agira dans cette thèse de coupler un code éléments finis en mécanique des structures décrivant le vêlage d'un iceberg, son contact avec le glacier et la réponse dynamique du glacier, avec un code CFD (Computational Fluid Dynamics) à surface libre décrivant le mouvement de l'eau généré par ce vêlage d'iceberg. Nous utiliserons conjointement le code de dynamique des fluides ISIS-CFD et un code de dynamique des solides Z-set ou le code Elmer-Ice. Le code ISIS-CFD résout les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds pour des écoulements turbulents à surface libre en interaction avec des corps rigides ou déformables. Pour la partie solide, il s'agira de poursuivre la mise en place du modèle de vêlage. Le code Z-set a permis pour l'instant de calculer le champ de déplacement et la force générée et transmise au sol par l'impact d'un iceberg 2D se retournant contre un terminus de glacier simplifié avec une langue glaciaire flottant sur l'océan et posée en amont sur un lit rocheux. La rhéologie élasto-viscoplastique de la glace est utilisée dans les calculs éléments finis ainsi qu'une combinaison de lois de frottement agissant à l'interface avec le lit rocheux. Des premiers résultats ont été obtenus dans la thèse de Pauline Bonnet, en prenant en compte la topographie complexe du glacier Helheim au Groenland. Nos résultats montrent que le détachement de l'iceberg peut engendrer un glissement du glacier émissaire sur le lit, et donc un signal sismique bien plus long que celui généré par le seul vêlage. L'analyse sismique deviendrait alors un outil puissant pour quantifier également la dynamique des écoulements glaciaires intermittents. Une partie importante du travail proposé sera l'extension de ces modèles à un domaine 3D tout en tenant compte des lois de frottement complexes à l'interface glacier-lit rocheux et de la topographie réelle. Une originalité de ce travail est sa **très forte composante pluridisciplinaire**. La thèse sera encadrée par des chercheurs en sismologie et écoulements gravitaires (IPGP), dynamique des fluides (LHEEA), et rhéologie des glaces polaires (PIMM).



**Figure 2.** Simulation numérique (code fluide/structure) de la rotation d'un iceberg dans l'océan et du mouvement de l'eau qu'il génère à plusieurs kilomètres de profondeur (*Bonnet et al., 2020*).

**Collaborations et campagne de terrain :** Ce travail se fera en collaboration avec une équipe japonaise de glaciologues et océanographes et une équipe suisse spécialisée en sismologie glaciaire. Une campagne de terrain au Groenland est prévue si le financement est obtenu. De plus, cette thèse se déroulera dans le cadre du réseau doctoral EnvSeis financé par l'Europe associant 10 laboratoires européens travaillant sur la sismologie environnementale.

Directrice : Anne MANGENEY, [mangeney@ipgp.fr](mailto:mangeney@ipgp.fr)

Co-directeur / Co-encadrant : Alban LEROYER, [alban.leroy@ec-nantes.fr](mailto:alban.leroy@ec-nantes.fr), et Olivier Castelnaud, ENSAM, [olivier.castelnaud@ensam.eu](mailto:olivier.castelnaud@ensam.eu)

Equipe d'accueil : IPGP- Equipe de Sismologie et Ecole Centrale de Nantes.

Financement : IPGP et DGA (financement acquis).

**Références :** **Bonnet**, P., Yastrebov, V. A., Queutey, P., Leroyer, A., Mangeney, A., et al. (2020). Modelling iceberg capsizing in the open ocean, *Geophys. J. Int.*, 223,1265–1287; **Ekström**, G. et al. (2003). Glacial earthquakes, *Science*, 302(5645), 622–624; **Howat**, I. M. et al. (2008). Synchronous retreat and acceleration of southeast greenland outlet glaciers 2000–06: Ice dynamics and coupling to climate. *J. Glaciology*, 54(187), 646–660; **Murray**, T. et al. (2015). Reverse glacier motion during iceberg calving and the cause of glacial earthquakes, *Science*, 349(6245), 305-308; **Nettles**, M. et al. (2008). Step-wise changes in glacier flow speed coincide with calving and glacial earthquakes at Helheim glacier, Greenland. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (24); **Sergeant**, A., Yastrebov, V., Mangeney, A. et al. (2018). Numerical modeling of the iceberg capsizing force responsible for glacial earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 123(11), 3013-3033; **Sergeant**, A., Mangeney, A. et al. (2019). Monitoring Greenland ice-sheet buoyancy-driven calving discharge using glacial earthquakes, *Annals of Glaciology*, 60(79), 75-95; **Walter**, F. et al. (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).