

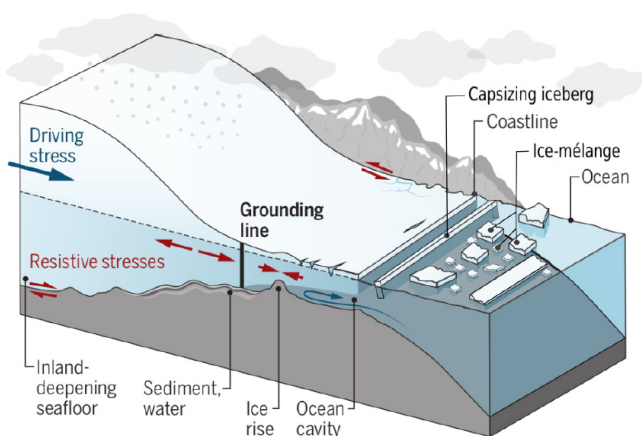
## Vers la surveillance du vêlage d'icebergs en région polaire par une approche couplée alliant modélisation fluide-structure et sismologie

**Développement du sujet et organisation du travail :** Une des questions fondamentales liée au changement climatique est la quantification de son impact sur les glaciers et les calottes polaires. Ces vingt dernières années, une accélération significative du retrait des glaciers côtiers est mesurée au Groenland. Quantifier et localiser la perte de masse de ces glaciers, 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 (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.

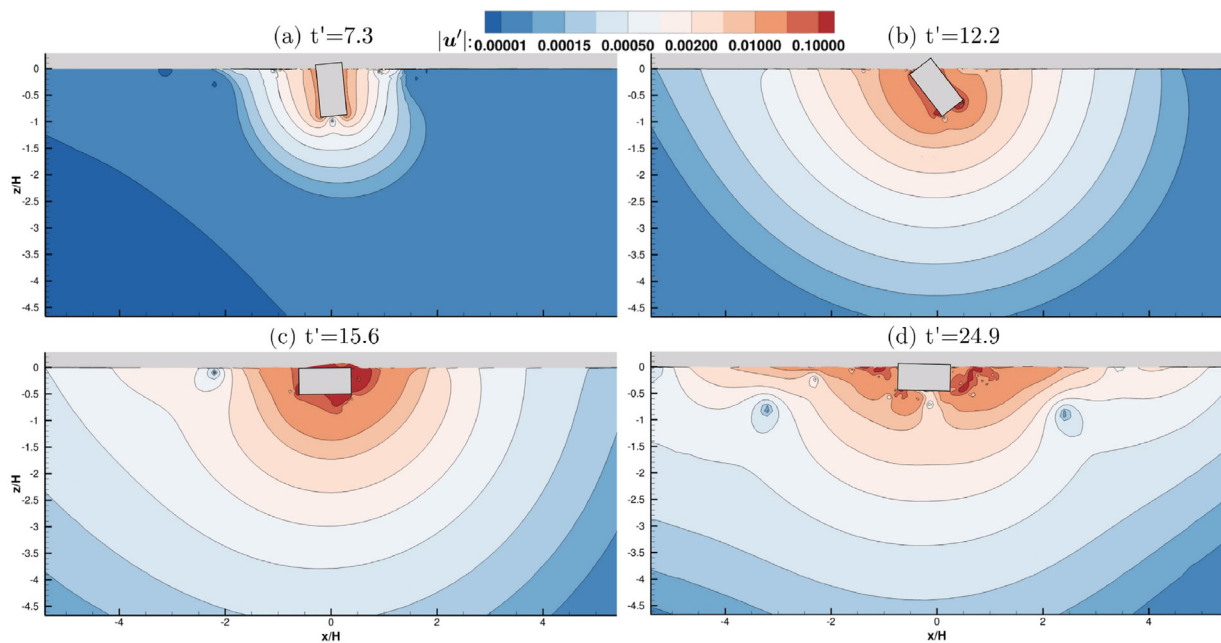
Le signal sismique généré lors du vêlage et du retournement d'icebergs instables, enregistré en continu, offre une opportunité unique pour suivre leur évolution. Ces séismes glaciaires sont enregistrés à des distances de plus de 100 km de la source et sont générés lors du détachement d'icebergs très volumineux ( $\sim \text{km}^3$ , gigatonne) qui, en se retournant, appliquent une force de plusieurs dizaines de giga-newtons sur le glacier. Cette force serait responsable d'un déplacement co-sismique du glacier. Nous avons récemment retrouvé les 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 aussi calculé le volume et la position des icebergs en comparant un premier catalogue de forces simulées aux 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. Nous avons appliqué les développements numériques récents en dynamique des fluides 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 mécaniques montrent que ces mouvements fluides jouent un rôle important dans la réponse dynamique du glacier. 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 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 mécanique des solides (Z-set ou Elmer-Ice). Le code ISIS-CFD résout les équations de Navier-Stokes pour des écoulements turbulents en interaction avec des solides en mouvement. Pour la partie solide, il s'agira de poursuivre la mise en place du modèle de glacier et de vêlage. Nous travaillerons à la fois sur des glaciers 2D et 3D de géométrie simple ainsi que sur le glacier Helheim au Groenland s'écoulant sur une topographie complexe. Une partie importante du travail proposé sera de tenir compte des lois de frottement complexes à l'interface glacier-lit rocheux. Des premiers 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. Une des originalités de ce travail est sa **composante pluridisciplinaire** (géophysique, dynamique des fluides, mécanique des solides).



**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 et une équipe allemande de glaciologues et océanographes et une équipe suisse spécialisée en sismologie glaciaire. Une campagne de terrain au Groenland est envisageable. De plus, cette thèse sera adossée au réseau doctoral EnvSeis (<https://www.envseis.eu/>) financé par l'Europe et associant 10 laboratoires européens travaillant sur la sismologie environnementale.

### Profil recherché

Nous recherchons un.e étudiant.e de Master 2, école d'ingénieur ou équivalent avec un bagage solide en géophysique, mécanique des fluides, mécanique des solides ou modélisation numérique. Les candidats devront être motivés par un travail multidisciplinaire à l'interface entre plusieurs équipes et disciplines. La thèse peut commencer dès janvier 2023.



### Encadrement

Directrice de thèse : Anne MANGENEY Anne, Professeure Université Paris Cité, [mangenev@ipgp.fr](mailto:mangenev@ipgp.fr)

Co-directeurs: Alban LEROYER, Maître de Conférence Ecole Centrale de Nantes, [alban.leroy@ec-nantes.fr](mailto:alban.leroy@ec-nantes.fr);

Olivier CASTELNAU, Directeur de Recherche CNRS, [olivier.castelnau@ensam.eu](mailto:olivier.castelnau@ensam.eu).

**Laboratoires et Equipes d'accueil** : Equipe de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) en collaboration avec le laboratoire LHEEA de l'Ecole Centrale de Nantes et le laboratoire PIMM de l'ENSAM-Paris.

### 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.
- 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.

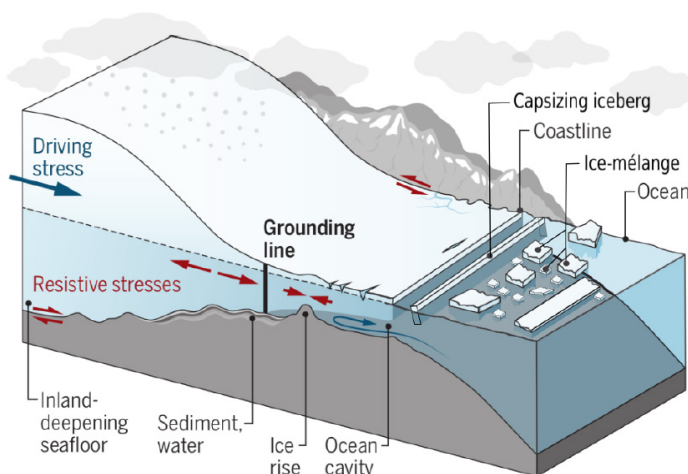
## Towards monitoring of iceberg calving in polar regions using a coupled approach combining fluid-structure modelling and seismology

**Development of the subject and organisation of the work:** One of the fundamental questions linked to climate change is the quantification of its impact on glaciers and polar ice caps. In the last twenty years, a significant acceleration of coastal glaciers retreat has been measured in Greenland. Quantifying and locating the ice mass loss of these glaciers, half of which is due to iceberg calving, is therefore a major challenge. In addition, there is a strong link, but still poorly understood, between iceberg calving and glacier dynamics, with calving sometimes leading to a significant acceleration in ice flow (Figure 1). The objective of this thesis is to make a breakthrough in the quantification of the spatio-temporal evolution of iceberg calving in polar regions by **combining numerical simulation of iceberg calving and glacier dynamics in fluid and solid mechanics with seismological inversion methods. The thesis proposed here will focus on numerical modelling.**

The seismic signal generated during the calving and capsizing of unstable icebergs, recorded continuously, offers a unique opportunity to monitor their evolution. These glacial earthquakes are recorded at distances of more than 100 km from the source and are generated during the detachment of very large icebergs ( $\sim \text{km}^3$ , giga-tonne) which, when they overturn, apply a force of several tens of giga-newtons on the glacier. This force would be responsible for a co-seismic displacement of the glacier. We have recently recovered the forces that cause glacial earthquakes by inverting the seismic waveforms. Using a simplified iceberg-ocean interaction model, we also calculated the volume and position of icebergs by comparing a first catalogue of simulated forces with seismic data (*Sergeant et al. 2018, 2019*).

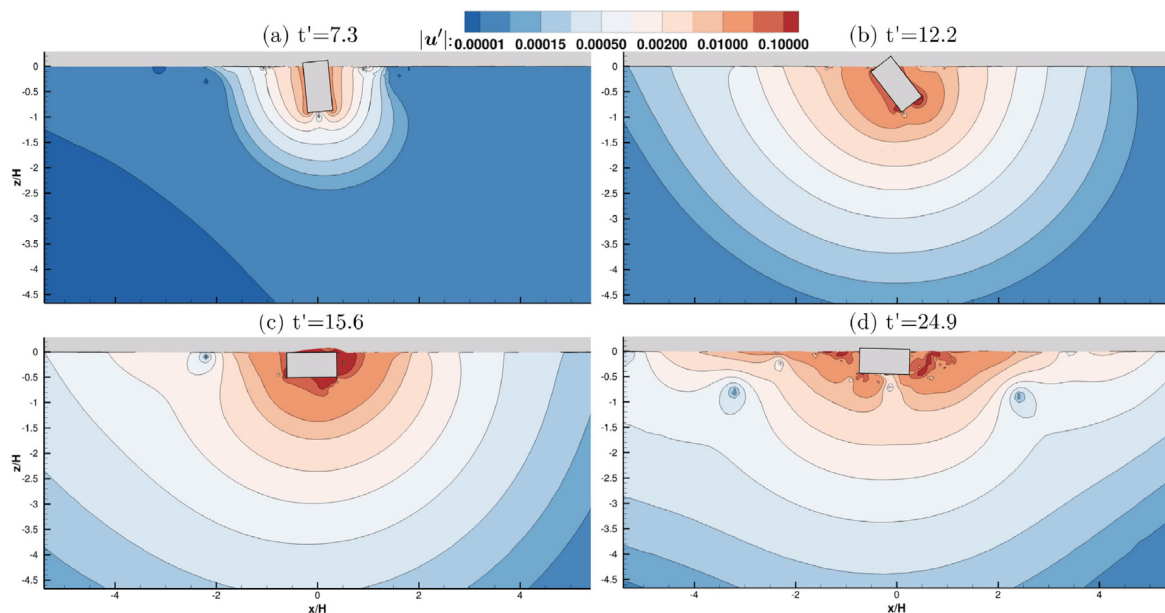
A major limitation of this first approach comes from the approximations made in the coupling between the motion of the iceberg and the surrounding ocean. We applied recent numerical developments in fluid dynamics to the problem of iceberg capsizing (*Bonnet et al. 2020*). This study showed that the **highly dynamic fluid motions generated by iceberg rotation can impact the ocean several km away** (Figure 2). On the other hand, mechanical modelling shows that these fluid motions play an important role in the dynamic response of the glacier. Developing a coupled glacier-iceberg-ocean-solid earth model is a unique way to quantify precisely these fluid movements, their role in the potential destabilisation of the glacier and their contribution to the seismic waves generated during calving. This is the work proposed in this thesis.

**highly dynamic fluid motions generated by iceberg rotation can impact the ocean several km away** (Figure 2). On the other hand, mechanical modelling shows that these fluid motions play an important role in the dynamic response of the glacier. Developing a coupled glacier-iceberg-ocean-solid earth model is a unique way to quantify precisely these fluid movements, their role in the potential destabilisation of the glacier and their contribution to the seismic waves generated during calving. This is the work proposed in this thesis.



**Figure 1.** Diagram of the ice front and iceberg calving in polar regions.

More precisely, this thesis will couple a finite element code in structure mechanics describing the calving of an iceberg and the dynamic response of the glacier, with a free surface CFD (Computational Fluid Dynamics) code describing the water movement generated by this iceberg calving. We will use jointly the ISIS-CFD fluid dynamics code and a solid mechanics code (Z-set or Elmer-Ice). The ISIS-CFD code solves the Navier-Stokes equations for turbulent flows interacting with moving solids. For the solid part, we will continue the implementation of the glacier and calving model. We will work on both 2D and 3D glaciers of simple geometry as well as on the Helheim glacier in Greenland flowing over a complex topography. An important part of the proposed work will be to take into account the complex friction laws at the glacier-rock interface. Initial results show that the detachment of the iceberg can lead to a sliding of the marine-terminating glacier at the glacier-bed interface, and thus to a much longer seismic signal than that generated by calving alone. Seismic analysis would then become a powerful tool for quantifying the dynamics of ice flow as well. An original aspect of this work is its **multidisciplinary** component (geophysics, fluid dynamics, solid mechanics).



**Figure 2.** Numerical simulation (fluid/structure code) of the rotation of an iceberg in the ocean and the water motion it generates at several kilometres depth (*Bonnet et al. 2020*).

**Collaborations and field campaign:** This work will be done in collaboration with a Japanese and a German team of glaciologists and oceanographers and a Swiss team specialised in glacial seismology. A field campaign in Greenland would be possible. In addition, this thesis will be supported by the EnvSeis doctoral network (<https://www.envseis.eu/>) funded by Europe and involving 10 European laboratories working on environmental seismology.

### Profile sought

We are looking for a student with a Master's degree, engineering school or equivalent with a solid background in geophysics, fluid mechanics, solid mechanics or numerical modelling. Candidates should be motivated by a multidisciplinary work at the interface between several teams and disciplines. The thesis can start in January 2023.



### Supervision

Thesis director: Anne MANGENEY Anne, Professor Université Paris Cité, [mangeneay@ipgp.fr](mailto:mangeneay@ipgp.fr)

Co-supervisors: Alban LEROYER, Assistant Professor, Ecole Centrale de Nantes, [alban.leroyer@ec-nantes.fr](mailto:alban.leroyer@ec-nantes.fr);

Olivier CASTELNAU, CNRS Research Director, [olivier.castelnau@ensam.eu](mailto:olivier.castelnau@ensam.eu).

**Host laboratories and teams:** Seismology group, Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) in collaboration with the LHEEA laboratory of Ecole Centrale de Nantes and the PIMM laboratory of ENSAM-Paris.

### 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.
- 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.

