



Sujet proposé pour un début de contrat en octobre 2019

---

**TITRE du SUJET : MODELISATION MECANIQUE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE  
APPLIQUEE AUX SEISMES GLACIAIRES EN REGION POLAIRE**

---

Directeur (trice) : **MANGENEY Anne, Professeur Université Paris Diderot,**  
[mangeney@ipgp.fr](mailto:mangeney@ipgp.fr)

Co-directeur (trice) / Co-encadrant(e) : **HIBERT Clément, Physicien Adjoint, EOST,**  
[hibert@unistra.fr](mailto:hibert@unistra.fr)

Equipe d'accueil : **IPGP- Equipe de sismologie – UMR7154**

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

---

Plus de renseignement voir : <http://ed560.ipgp.fr>, Rubrique : Offres\_de\_thèse  
Il est indispensable de faire acte de candidature sur le site de l'Ecole doctorale

---

### Problématique générale

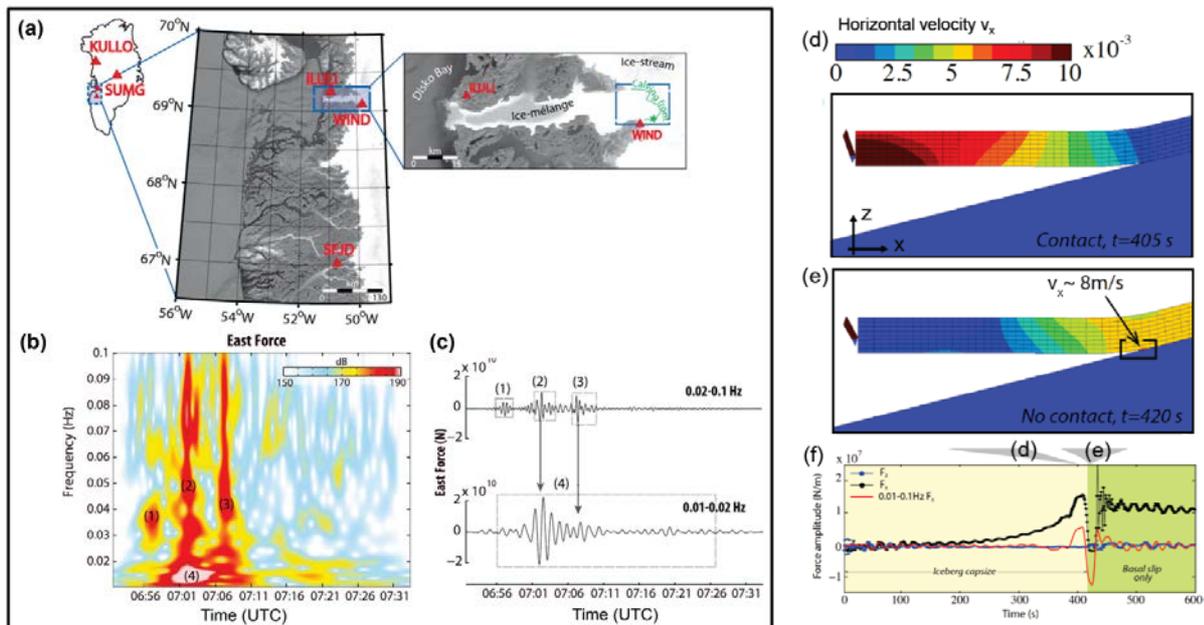
L'écoulement des glaciers émissaires en régions polaires est fortement impacté par le réchauffement climatique. Une des questions fondamentales est la quantification de la perte de masse de ces glaciers. Le travail proposé dans cette thèse permettra le suivi spatio-temporel de la perte de masse par vêlage d'icebergs, qui en est une composante essentielle.

Il existe un fort couplage entre le vêlage d'icebergs et la dynamique d'écoulement des glaciers. Ce couplage est encore mal compris du fait de la méconnaissance des processus impliqués et de la difficulté à mesurer le phénomène. Dans ce contexte, le signal sismique généré lors de ces épisodes, et enregistré en continu, offre un outil unique pour leur étude.

Les séismes glaciaires ont des magnitudes comprises entre 4.6 et 5.2. Ils sont enregistrés à des distances télé-sismiques, et la plupart sont localisés au niveau des glaciers émissaires de la calotte groenlandaise. Le nombre croissant d'événements sismiques détectés est corrélé à l'évolution du retrait des glaciers. Ces séismes ont été associés au détachement d'icebergs très volumineux (~ km<sup>3</sup>), qui se retournent lentement en impactant le terminus glaciaire. Cette force serait responsable d'un déplacement co-sismique du glacier.

Dans le cadre de la thèse d'Amandine Sergeant (2016), nous avons retrouvé les histoires de force à l'origine des séismes glaciaires en inversant les formes d'ondes sismiques, sans a priori sur le modèle de force. Les forces retrouvées se sont avérées beaucoup plus riches en information que celles proposées dans la littérature. En couplant cette inversion à l'analyse d'un film montrant une séquence de vêlage sur un site instrumenté, nous avons montré l'existence de plusieurs phénomènes responsables de la génération du signal sismique : avalanche de glace, vêlage et retournement d'un premier puis d'un second iceberg, accélération de l'ice-mélange constitué de débris de glace flottante (**Figure 1 a-c**). Retrouver les dimensions des icebergs à partir des signaux sismiques est un challenge tant par la variété des processus mis en jeu que par la complexité du phénomène de vêlage.

La modélisation mécanique du processus de vêlage, initiée dans les thèses de A. Sergeant et de P. Bonnet, est un moyen privilégié pour guider l'inversion sismologique. Le modèle de dynamique de l'iceberg que nous avons développé, basé sur la méthode des Eléments Finis, tient compte de l'interaction glace-océan (**Figure 1 d-f**). Le couplage modélisation mécanique et sismologie a permis pour la première fois de retrouver le volume et la position de l'iceberg en comparant un catalogue de forces simulées en 2D à la force inversée à partir des données sismiques. Nous avons ainsi pu reconstituer l'histoire spatio-temporelle de la perte de masse liée aux icebergs au Groenland durant les 20 dernières années (Sergeant et al., 2019). Cette approche s'avère très prometteuse pour estimer les pertes de masse liées au vêlage d'icebergs.



**Figure 1 :** (a) Images Landsat du Jakobshavn Isbrae (Groenland Ouest) et stations sismiques utilisées pour l'inversion de la force d'un séisme glaciaire dont la variation temporelle et spectrale est montrée en (b, spectrogramme) et (c). (d)-(e) Modélisation numérique par Eléments Finis de la langue glaciaire et de l'iceberg et (f) calcul de la force générée lors du vêlage.

**Programme de la thèse :** Plusieurs questions clés restent pourtant en suspens pour pouvoir réellement exploiter le couplage entre modélisation mécanique et sismologie: Le glissement du glacier sur son lit rocheux contribue-t-il à la génération d'ondes sismiques ? Quel est l'effet de la réponse du glacier lors du détachement d'icebergs sur les forces à l'origine du signal sismique ? Quels sont les effets 3D sur ces forces ? Comment peut-on appliquer le couplage mécanique-sismologie à la caractérisation de plus petits icebergs créant des séismes de faible magnitude ? Nous proposons dans cette thèse de s'attaquer à ces questions, à travers 4 axes de recherche :

### 1 – Modélisation mécanique

Il s'agira de poursuivre la mise en place du modèle de vêlage, basé sur le code Eléments Finis Z-set développé par l'Ecole des Mines de Paris et l'ONERA. Une rhéologie réaliste de la glace sera utilisée. Une partie importante du travail sera la prise en compte de lois de frottement à l'interface glacier-lit rocheux, puisque que ce frottement contrôle le transfert des efforts vers la terre solide. Le modèle élément-finis sera ensuite étendu à des simulations 3D de cas réels.

### 2 – Caractérisation du catalogue de séismes glaciaires et quantification de la variation spatio-temporelle de la perte de masse liés aux icebergs

Il s'agira ensuite d'établir une base de données de sismogrammes enregistrés par les réseaux régionaux. Les forces à l'origine des séismes glaciaires seront alors calculées en utilisant une méthode d'inversion de forme d'onde et comparées avec la simulation Eléments Finis, afin de retrouver caractéristiques des icebergs (notamment leur volume). Cette base de données servira aussi à entraîner un algorithme d'apprentissage machine à reconnaître les signaux sismiques émis par les séismes glaciaires. Ce modèle sera intégré à une chaîne de traitement qui permettra de parcourir plus de 20 ans de données sismologiques continues pour reconstituer un catalogue exhaustif d'événements glaciaires. Cette approche a déjà été utilisée pour reconstituer l'activité gravitaire en Alaska sur 22 ans, et le modèle d'apprentissage machine (basé sur l'algorithme des "Random Forests") a été déployé à l'OVFP pour reconnaître les sources de la microsismicité. Des tests préliminaires ont démontré que ce modèle était capable de reconnaître avec une précision de 100% les séismes glaciaires sur un jeu de donnée restreint.

### 3 – Etude des caractéristiques optimales d'un réseau de capteurs sismiques permettant d'améliorer ce catalogue

Nous chercherons à étendre cette approche à la caractérisation du vêlage d'icebergs plus petits et non détectables à l'échelle globale ou même régionale. Nous choisirons un site test stratégique

avec une station sismologique localisée près d'un front de vêlage et détecterons des petites sources que nous caractériserons et simulerons numériquement.

#### 4 - Caractérisation de propriétés physiques des Ice-quake par des modèles entraînés prédictifs

Outre la classification et l'identification des sources sismiques, certains modèles d'apprentissage machine peuvent aussi être utilisés pour prédire une quantité en fonction de paramètres d'entrées (par exemple le temps auquel va se produire un séisme en fonction de l'accélération de signaux précurseurs). Dans ce projet il s'agira de tester ce mode d'utilisation des algorithmes d'apprentissage machine pour essayer de prédire les paramètres de la source (volume, géométrie) en fonction des attributs des signaux sismiques générés. Nous utiliserons dans un premier temps des sismogrammes synthétiques générés à partir de la banque de données de sources de séismes glaciaires pour entraîner le modèle. Nous testerons ensuite ce modèle pour caractériser des sources dont les caractéristiques sont connues. En cas de résultats positifs, cette approche sera utilisée pour caractériser les propriétés des sources des signaux intégrés au catalogue exhaustif évoqué précédemment.