



Sujet de la thèse proposée

MODELISATION MECANIQUE ET ANALYSE SISMOLOGIQUE DE LA SOURCE DES SEISMES GLACIAIRES EN REGION POLAIRE

Direction de thèse: MANGENEY Anne, PR, mangene@ipgp.fr
Co-direction: YASTREBOV, Vladislav, vladislav.yastrebov@mines-paristech.fr
Co-encadrement: CASTELNAU Olivier, olivier.castelnaud@ensam.eu
Host lab/ Team: **Institut de Physique du Globe de Paris, Equipe de sismologie - UMR7154 et Centre des Matériaux – UMR 7633, Mines ParisTech**

Financing: Doctoral contract with or without assignment

For more information go to <http://ed109.ipgp.fr>, section: Offres de these (PhD offer), You must apply on the Doctoral School website

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. Les séismes glaciaires sont caractérisés par la présence d'ondes de surface longue-période (~10-100 s) dont le diagramme de radiation décrit un mécanisme de force à l'origine globalement alignée avec la direction de l'écoulement du glacier. Ces séismes ont été associés au détachement d'icebergs très volumineux (~ km³), qui se retournent lentement en impactant le terminus glaciaire. La force de contact générée serait responsable d'un déplacement co-sismique du glacier.

Jusqu'à très récemment, la source des séismes glaciaires était caractérisée avec des modèles de force très restrictifs, rendant difficile leur interprétation en termes de mécanismes physiques. 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**, [vidéo 1](#), [vidéo 2](#)). Ces sources génèrent des forces dans le système glaciaire dont les amplitudes, les durées et les signatures spectrales varient. Ainsi, 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, initié dans la thèse de A. Sergeant, 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 et du contact avec la langue glaciaire (**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. Cette approche s'avère donc être très prometteuse pour estimer les pertes de masse liées au vêlage d'icebergs.

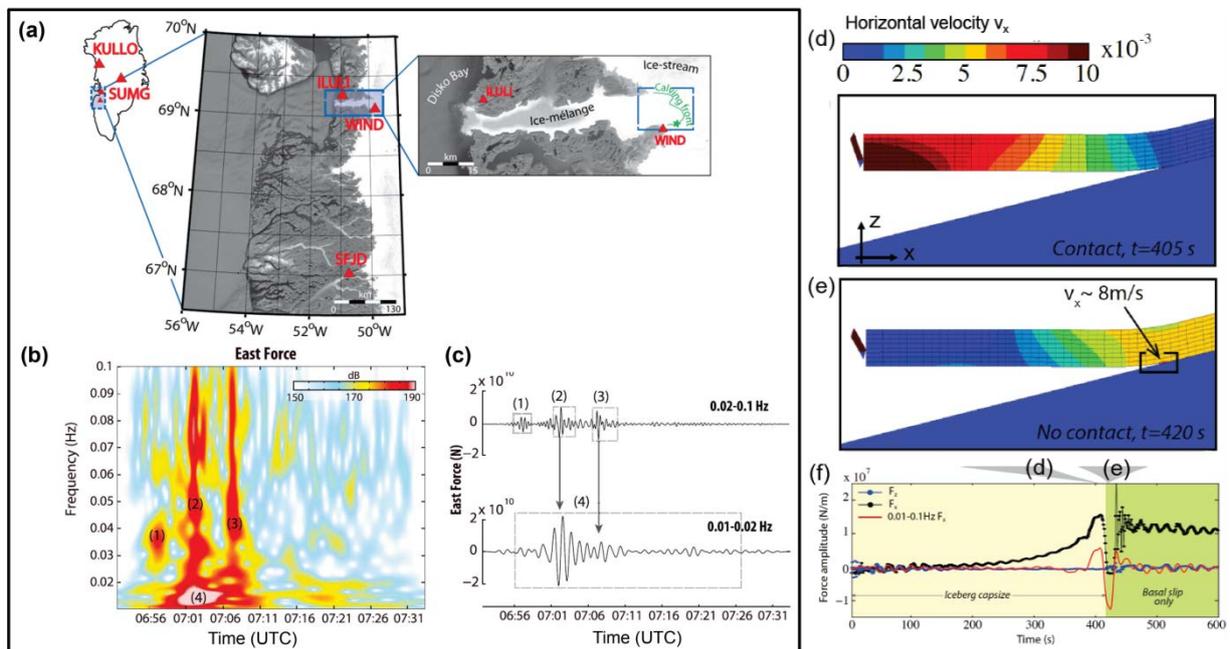


Figure 1 : (a) Images Landsat du Jakobshavn Isbrae (Groenland Ouest) et stations sismiques utilisées pour l'inversion de la force d'un séisme glaciaire dont la variation temporelle et spectrale (composante Est) est montrée en (b, spectrogramme) et (c) respectivement. La complexité de la force illustre les différents processus impliqués à savoir (1) une avalanche de glace, (2-3) le vêlage et retournement de deux icebergs successifs et (4) l'accélération de l'ice-mélange dans le fjord glaciaire. (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. On peut observer sur la force filtrée entre 0.01 et 0.1 Hz (rouge) un signal lié à la force normale exercée par l'iceberg sur le terminus (zone jaune clair correspondant à (d)) et un signal généré par le glissement basal (zone verte correspondant à (e)), après le détachement de l'iceberg.

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 la déformation du glacier lors du détachement d'icebergs et comment affecte-elle le signal sismique ? Est ce que les effets 3D enrichissent le modèle ? La



topographie locale influence-t-elles les forces de contact ? Comment peut-on appliquer le couplage mécanique-sismologie à la caractérisation de petits icebergs créant des séismes de faible magnitude ? Des informations pertinentes peuvent-elles être extraites des signaux hautes fréquences ? Peut-on quantifier l'évolution de la perte de masse de la calotte groenlandaise en utilisant les signaux sismiques ?

Nous proposons dans cette thèse de s'attaquer à ces questions. Le travail sera structuré autour de trois axes :

1 – Modélisation mécanique

Il s'agira de poursuivre la mise en place du modèle de vêlage, basé sur le logiciel Eléments Finis Z-set (www.zset-software.com) développé au Centre des matériaux de l'École des Mines de Paris et l'ONERA. Une interaction simplifiée fluide/structure pour simuler le vêlage des icebergs dans l'océan est déjà intégrée dans le code (friction visqueuse), une rhéologie réaliste de la glace sera utilisée pour modéliser l'écoulement du glacier. Une partie importante du travail sera centrée sur la prise en compte de lois de frottement à l'interface glacier-lit rocheux, puisque que ce frottement contrôle le transfert du signal sismique 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, extraite de la banque de données des séismes glaciaires détectés à l'échelle globale. Les forces à l'origine des séismes glaciaires seront alors calculées en utilisant une méthode d'inversion de forme d'onde sans a priori sur la fonction source. Ces forces inversées seront alors comparées avec la simulation Eléments Finis, afin de retrouver caractéristiques des icebergs (notamment leur volume).

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.

Equipe d'encadrement

Le doctorant sera encadré par une **équipe pluridisciplinaire** :

[Anne Mangeny](#) (Professeur d'Université, IPGP) : Ecoulements Géophysiques

[Vladislav Yastrebov](#) (Chargé de Recherche CNRS, Centre des matériaux, Mines ParisTech) : Mécanique Numérique et mécanique du contact/frottement

[Olivier Castelnau](#) (Directeur de Recherche CNRS, laboratoire PIMM, ENSAM Paris) : Mécanique des Matériaux

[Jean-Paul Montagner](#) (Professeur d'Université, IPGP) : Sismologie

[Eleonore Stutzmann](#) (Physicien, IPGP) : Sismologie



Profil recherché

Nous recherchons un(e) candidat(e) avec une solide formation initiale (Master 2 Recherche ou équivalent) en Mécanique, Modélisation et/ou en Géophysique. Il/elle doit avoir un goût pour le calcul numérique et le traitement des données, et faire preuve d'une grande motivation, de rigueur, d'autonomie, de curiosité, de perspicacité, d'ouverture, d'esprit de synthèse. La capacité à travailler dans une équipe pluridisciplinaire est également un point important.

Condition de travail

Le/la candidat(e) aura un contrat de travail de 3 ans co-financé par la Direction Générale de l'Armement (DGA). Il sera inscrit à l'Ecole Doctorale de l'IPGP. Le candidat aura la possibilité d'enseigner à l'Université Paris Diderot s'il le souhaite.

Candidatures

Les candidatures doivent être envoyées par email à anne.mangeney@gmail.com et vladislav.yastrebov@mines-paristech.fr. Le dossier contiendra les documents suivants : CV, lettre de motivation, copie des principaux diplômes de l'enseignement supérieur, relevés de note, lettre de recommandation éventuelle.

Contacts

Anne Mangeney, anne.mangeney@gmail.com, tel : +33 6.83.18.26.85

Vladislav Yastrebov, vladislav.yastrebov@mines-paristech.fr, tel : +331.60.76.31.53