



ÉCOLE DOCTORALE

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

ed560.stepup@u-paris.fr

Titre du sujet : Impact du changement climatique sur l'évolution du paysage : fonte des glaces, déformation crustale et évolution du pergélisol aux îles Kerguelen

Directeur (trice) :

GRANDIN Raphaël, MCF, grandin@ipgp.fr

Co-directeur (trice) / Co-encadrant(e) : *choisir éventuellement un.e co-directeur.trice avec HDR ou un.e coencadrant.e sans HDR supprimer les mots inutiles et ceux en italique*

CHANARD, Kristel, CR, chanard@ipgp.fr

Equipe d'accueil : *à préciser et supprimer la ligne inutile*

**IPGP- Equipe de Tectonique et mécanique de la lithosphère et
Equipe de Géodésie – UMR7154**

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

Développement du sujet : (Maximum 2 pages)

Les glaciers situés en périphérie des régions polaires sont extrêmement sensibles aux variations atmosphériques et océaniques causées par le changement climatique actuel. Au cours des dernières décennies, l'imagerie satellitaire a mis en évidence des niveaux record de perte de masse de ces glaciers, particulièrement prononcés en Patagonie et sur l'archipel des Kerguelen (e.g. Hugonnet et al., 2021). Les déformations de la surface du sol en réponse à la fonte de ces glaciers sont aujourd'hui mesurables par interférométrie radar (InSAR; Liu et al., 2011; Drouin et al., 2019) avec une couverture spatiale et une précision de l'ordre du mm/an sans précédent (e.g. Doin et al., 2011 ; Grandin et al., 2015). Ces déformations révèlent des interactions complexes entre fonte des glaces, déformation de la croûte, évolution du pergélisol et sismicité que cette thèse se propose d'explorer en exploitant une synergie d'observations satellitaires, tout en s'appuyant sur l'ensemble des données géophysiques, géologiques et géomorphologiques disponibles.

Dans ce cadre, l'archipel volcanique des îles Kerguelen (49°S, 69°E) offre un laboratoire naturel unique pour étudier les effets du changement climatique sur l'évolution des paysages dans les régions sub-polaires. Depuis les années 1970, les glaciers de cette région ont reculé de manière spectaculaire, avec la calotte Cook (~400 km²) perdant 20% de sa surface en seulement 40 ans (Berthier et al., 2009; Figure 1B). La série temporelle de déformation InSAR obtenue à partir de la mission satellite Sentinel 1 entre 2015 et 2021 révèle un soulèvement crustal centré sur la calotte glaciaire de Cook, atteignant jusqu'à ~ 5 mm/an (Figure 1A). Ce soulèvement est d'amplitude et d'extension spatiale supérieure à celle attendue pour une réponse élastique de la terre solide à la fonte récente des glaces. Cette déformation pourrait être expliquée par une source magmatique dont les caractéristiques sont néanmoins peu probables. De plus, ces données InSAR révèlent l'existence de ruptures de surface superficielles associées à des séismes de magnitude 4+ à proximité de la calotte Cook (Figure 1C), confirmée par une analyse récente de la sismicité régionale (Lengliné et al., 2023) . Finalement, des motifs de déformation de plus petite échelle spatiale sont observés dans certaines régions, compatibles avec des mouvements d'origine gravitaire, suggérant une déformation associée à l'évolution du pergélisol qui, lorsqu'il dégèle, peut entraîner un affaissement et/ou une érosion du sol (Figure 1; Daout et al., 2017).

L'objectif de cette thèse est de quantifier et de comprendre les processus physiques associés à ces déformations, qui opèrent à différentes échelles. La déformation crustale observée aujourd'hui aux îles Kerguelen est-elle reliée à la fonte récente et/ou passée des glaces et si oui, quelles contraintes permet-elle de placer sur la rhéologie de la terre ? Quelle est l'origine de la sismicité récente aux îles Kerguelen et est-elle liée à la déformation crustale observée ? Comment l'évolution du pergélisol en réponse au changement climatique impacte-t-elle la déformation du sol aux îles Kerguelen ? Existe-t-il une composante magmatique ou hydrothermale dans les déformations observées ?

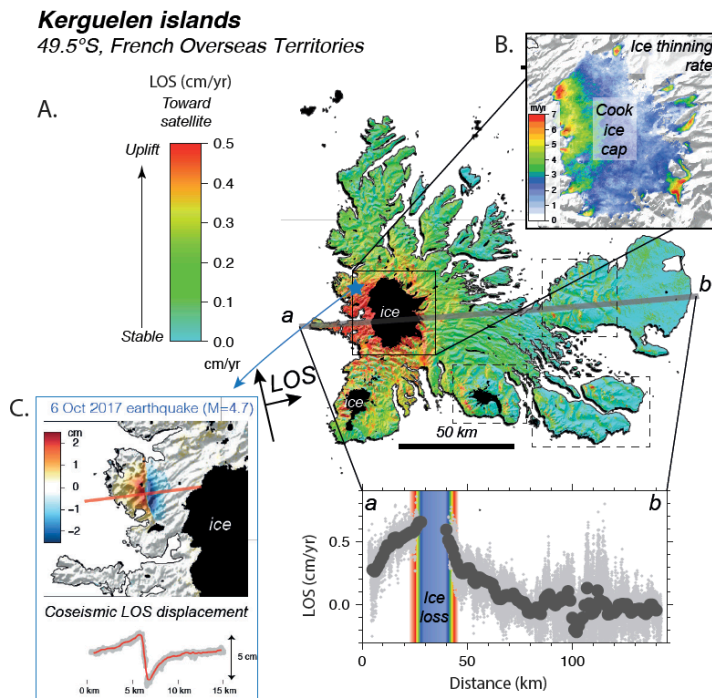


Figure 1: Iles Kerguelen - R. Grandin
A) Taux de déformation du sol dérivé de Sentinel-1 de 2015 à 2021 dans la ligne de visée (LOS) du satellite et coupe le long de ab. Les zones de déformation identifiées comme liées à l'évolution du pergélisol sont indiquées par les encadrés tiretés. B) Taux de variation de l'élévation de la surface de la glace. C) Déformation du sol associée au séisme d'octobre 2017 de M 4.7.

Dans un premier temps, cette thèse s'attachera à quantifier l'évolution récente de l'élévation de la glace aux îles Kerguelen par différence de Modèles Numériques de Terrain (MNT) obtenus à partir d'images satellitaires telles que SPOT 6 et Pléiades. Ces observations seront couplées à des données historiques sur l'étendue de glace, ainsi qu'à des modèles physiques d'écoulement de glace afin d'obtenir une histoire complète de l'évolution de glace depuis sa déstabilisation dans les années 1970. Parallèlement, nous traiterons l'archive complète d'images SAR Sentinel-1 ascendantes et descendantes, acquises respectivement depuis 2015 et 2022, pour obtenir une série temporelle de déformation actualisée et plus précise des îles Kerguelen. Nous modéliserons ensuite les déformations viscoélastiques de la terre solide associées à la décharge de glace pour expliquer la déformation observée. Ce travail permettra de placer une contrainte importante et inédite sur la rhéologie de la terre, et en particulier la viscosité de la croûte inférieure et/ou du manteau supérieur, à une échelle de temps de quelques décennies, contribuant à une meilleure compréhension de la réponse mécanique de la Terre à travers les échelles de temps. Ensuite, cette thèse explorera le lien de causalité possible entre le déchargement de glace et activité sismique à proximité de la Calotte Cook. Pour cela, nous modéliserons les contraintes associées à la déformation (visco-)élastique liée à la fonte récente et évaluerons leur rôle possible dans le déclenchement des ruptures sismiques superficielles observées. Afin de n'écarter aucune possibilité, l'existence d'une composante magmatique ou hydrothermale sera explorée par des inversions élastiques, et les géométries de sources obtenues seront confrontées avec celles connues dans d'autres provinces géologiques comparables. Compte tenu de la complexité tectonique d'autres régions où les glaciers et calottes évoluent vite, les Kerguelen offrent un site unique pour mieux comprendre l'impact de la décharge de glace sur la sismicité. Enfin, nous caractériserons la déformation associée à l'évolution du pergélisol, à partir de données InSAR et d'observations géomorphologiques, en fonction de plusieurs paramètres physiques (topographie, type de sols, température, précipitations, etc.), afin de proposer un modèle thermo-poro-mécanique d'évolution de la déformation en réponse au gel/dégel du pergélisol. Mieux caractériser et modéliser la déformation associée aux changements du pergélisol est essentiel pour mieux évaluer et atténuer les risques d'instabilités de pentes, mouvements et/ou glissements de terrain mettant en danger les infrastructures humaines et les écosystèmes fragiles.

L'étude de l'impact du changement climatique sur l'évolution du paysage aux îles Kerguelen permettra de mieux comprendre le lien entre fonte des glaces, déformation de la surface et sismicité en région sub-polaires et pourra être étendue à d'autres cas d'études présentant des caractéristiques

géologiques et environnementales comparables, et des superficies plus grandes, tels que la Patagonie ou la Géorgie du Sud.

Références:

- Berthier, E., Le Bris, R., Mabileau, L., Testut, L., & Rémy, F. (2009). Ice wastage on the Kerguelen Islands (49 S, 69 E) between 1963 and 2006. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114(F3).
- Daout, S., Doin, M. P., Peltzer, G., Socquet, A., & Lasserre, C. (2017). Large-scale InSAR monitoring of permafrost freeze-thaw cycles on the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 44(2), 901-909.
- Doin, M. P., Lodge, F., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Ducret, G., ... & Pinel, V. (2011, September). Presentation of the Small Baseline NSBAS Processing Chain on a Case Example: The Etan Deformation Monitoring from 2003 to 2010 Using Envisat Data. In *Fringe Symposium*.
- Drouin, V., & Sigmundsson, F. (2019). Countrywide observations of plate spreading and glacial isostatic adjustment in Iceland inferred by sentinel-1 radar interferometry, 2015–2018. *Geophysical Research Letters*, 46(14), 8046-8055.
- Grandin, R., Klein, E., Métois, M., & Vigny, C. (2016). Three-dimensional displacement field of the 2015 Mw8.3 Illapel earthquake (Chile) from across-and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letters*, 43(6), 2552-2561.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., ... & Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726-731.
- Lengliné, O., Rimpôt, J., Maggi, A., & Zigone, D. (2023). Recent seismicity on the Kerguelen islands: Kerguelen seismicity. *Seismica*, 2(2).
- Liu, L., Wahr, J., Howat, I., Khan, S. A., Joughin, I., & Furuya, M. (2012). Constraining ice mass loss from Jakobshavn Isbræ (Greenland) using InSAR-measured crustal uplift. *Geophysical Journal International*, 188(3), 994-1006.