

# Vers des prédictions robustes de la dynamique de la calotte polaire de l'Antarctique :

Quantification de l'incertitude sur les projections de l'augmentation du niveau des mers et du retrait de la ligne d'ancrage à l'aide de modèles glaciologiques essentiels

Bulthuis Kevin

Résumé

Les progrès récents effectués dans la modélisation de la dynamique de la calotte polaire de l'Antarctique ont donné lieu à un changement de paradigme vis-à-vis de la perception de la calotte polaire de l'Antarctique face au changement climatique. Une meilleure compréhension de la dynamique de la calotte polaire de l'Antarctique suggère désormais que la réponse de la calotte polaire de l'Antarctique au changement climatique sera déterminée par des mécanismes d'instabilité dans les régions marines. Tandis qu'un nouvel engouement se porte sur une meilleure compréhension de la réponse de la calotte polaire de l'Antarctique au changement climatique, un intérêt particulier se porte simultanément vers le besoin de quantifier les incertitudes sur l'évolution de la calotte polaire de l'Antarctique ainsi que de clarifier le rôle joué par les incertitudes sur le comportement de la calotte polaire de l'Antarctique en réponse au changement climatique.

D'un point de vue numérique, les modèles glaciologiques dits essentiels ont récemment été développés afin de fournir des modèles numériques efficaces en temps de calcul dans le but de réaliser des simulations à grande échelle et sur le long terme de la dynamique des calottes polaires ainsi que dans l'optique de coupler le comportement des calottes polaires avec des modèles globaux du système terrestre. L'efficacité en temps de calcul de ces modèles glaciologiques essentiels, tels que le modèle f.ETISH (fast Elementary Thermomechanical Ice Sheet) développé à l'Université Libre de Bruxelles, repose sur une modélisation des mécanismes et des rétroactions essentiels gouvernant la thermodynamique des calottes polaires au travers de modèles d'ordre réduit et de paramétrisations. Vu l'efficacité en temps de calcul des modèles glaciologiques essentiels, l'utilisation de ces modèles en complément des méthodes du domaine de la quantification des incertitudes offrent de nombreuses opportunités afin de mener des analyses plus complètes de l'impact des incertitudes dans les modèles glaciologiques ainsi que de développer de nouvelles méthodes du domaine de la quantification des incertitudes dans le cadre de la modélisation glaciologique.

Les contributions de cette thèse sont doubles. D'une part, nous contribuons à une nouvelle estimation et une nouvelle compréhension de l'impact des incertitudes sur la réponse de la calotte polaire de l'Antarctique dans les prochains siècles. D'autre part, nous contribuons au développement de nouvelles méthodes pour la quantification des incertitudes sur les caractéristiques géométriques de la réponse spatiale de modèles physiques numériques avec, comme motivation en glaciologie, un intérêt particulier vers la prédiction sous incertitudes du retrait de la région de la calotte polaire de l'Antarctique en contact avec le lit rocheux.

Dans le cadre de la première contribution, nous réalisons de nouvelles projections probabilistes de la réponse de la calotte polaire de l'Antarctique au changement climatique au cours des prochains siècles à l'aide du modèle numérique f.ETISH. Nous appliquons des méthodes

du domaine de la quantification des incertitudes au modèle numérique f.ETISh afin d'étudier l'impact de différentes sources d'incertitude sur la réponse continentale de la calotte polaire de l'Antarctique. Les sources d'incertitude étudiées sont relatives au forçage atmosphérique, au glissement basal, à la paramétrisation du flux à la ligne d'ancrage, au vêlage, à la fonte sous les barrières de glace, à la rhéologie des barrières de glace et à la relaxation du lit rocheux. Nous réalisons de nouvelles projections probabilistes de la contribution de la calotte polaire de l'Antarctique à l'augmentation future du niveau des mers ; nous réalisons une analyse de sensibilité afin de déterminer les sources d'incertitude les plus influentes ; et nous réalisons de nouvelles projections probabilistes du retrait de la région de la calotte polaire de l'Antarctique en contact avec le lit rocheux.

Dans le cadre de la seconde contribution, nous étudions la quantification des incertitudes sur les caractéristiques géométriques de la réponse spatiale de modèles physiques numériques dans le cadre de la théorie des ensembles aléatoires. Dans le cadre de la théorie des ensembles aléatoires, nous développons le concept de régions de confiance qui contiennent ou bien sont inclus dans un ensemble d'excursion de la réponse spatiale du modèle numérique avec un niveau donné de probabilité. Afin d'estimer ces régions de confiance, nous proposons de formuler l'estimation de ces régions de confiance dans une famille d'ensembles paramétrés comme un problème d'estimation de quantiles d'une variable aléatoire et nous proposons une nouvelle méthode de type multifidélité pour estimer ces quantiles. Finalement, nous démontrons l'efficacité de cette nouvelle méthode dans le cadre d'une application relative au retrait de la région de la calotte polaire de l'Antarctique en contact avec le lit rocheux.

En plus de ces deux contributions principales, nous contribuons à deux travaux de recherche additionnels. D'une part, nous contribuons à un travail de recherche relatif au calcul des indices de Sobol en analyse de sensibilité dans le cadre de petits ensembles de données à l'aide d'une nouvelle méthode d'apprentissage probabiliste sur des variétés géométriques. D'autre part, nous fournissons une comparaison multimodèle de différentes projections de la contribution de la calotte polaire de l'Antarctique à l'augmentation du niveau des mers.

**Mots-clés** : Quantification des incertitudes, projections probabilistes, régions de confiance, modèles glaciologiques essentiels, calotte polaire de l'Antarctique.