

Résumé

La calotte polaire antarctique représente le plus gros contributeur potentiel à l'élévation future du niveau des mers. On estime que 80 % du volume de glace déchargée de la calotte vers l'océan transite par les vastes plateformes flottantes qui bordent près de 45 % de la côte du continent. En vertu du principe d'Archimède, la contribution de la glace au niveau des mers est comptabilisée aussitôt que celle-ci franchit la ligne d'échouage qui marque la limite au delà de laquelle la glace posée sur le socle se met à flotter sur l'océan. Par conséquent, une modélisation réaliste de la dynamique de la ligne d'échouage est capitale pour obtenir des projections de l'évolution future du niveau des mers dignes de confiance. Cette dynamique est affectée par un certain nombre de processus physiques mal représentés dans les modèles d'écoulement glaciaire actuels. Cette thèse s'intéresse à deux de ces processus : l'endommagement de la glace d'une part et le frottement basal en lien avec l'hydrologie sous-glaciaire d'autre part.

L'endommagement caractérise la dégradation des propriétés mécaniques de la glace due à la présence de fractures et crevasses telles qu'on les observe communément à la surface des glaciers. Cet endommagement rétroagit sur l'écoulement en réduisant la viscosité de la glace. La loi d'évolution de l'endommagement fait intervenir une équation d'advection pure dont la résolution numérique nécessite l'adoption de méthodes de stabilisation. Nous montrons que, pour des maillages associés à des temps de calcul acceptables, la dynamique de la ligne d'échouage est sensible au choix de cette méthode, ce qui complique nettement la modélisation des processus d'endommagement.

Le frottement basal est représenté au sein des modèles par l'intermédiaire de lois de frottement qui visent à expliciter le lien entre vitesses basales et contraintes de cisaillement basales. Différentes formulations de ces lois ont été proposées au cours des dernières décennies sur la base d'arguments théoriques. Certaines d'entre elles intègrent explicitement l'effet de la pression de l'eau présente au sein du réseau de drainage sous-glaciaire, connue pour favoriser le mouvement basal. Malheureusement, les échelles spatiales et temporelles mises en jeu en glaciologie empêchent la validation *in situ* de ces différentes formulations et les modèles grande échelle optent habituellement pour la plus simple d'entre elles, la loi de Weertman. L'effet de la pression de l'eau sous-glaciaire sur le frottement basal est alors pris en compte de manière implicite via un coefficient de frottement dont la distribution est évaluée à l'aide de méthodes inverses. Faute de contrainte sur l'évolution temporelle de cette distribution, celle-ci est généralement maintenue stationnaire et une discontinuité peu réaliste du frottement apparaît à la ligne d'échouage dès lors qu'elle recule. Dans un premier temps, nous montrons que la dynamique de la ligne d'échouage modélisée est sensible à la manière dont cette discontinuité est traitée numériquement. Dans un second temps, nous mettons en évidence sur un cas synthétique que la prise en compte explicite de l'action de la pression de l'eau sous-glaciaire sur le frottement basal conduit à un phénomène de rétroactions positives qui induit des pertes de masse accrues. Enfin, nous étendons ces conclusions à un cas réel, le bassin d'Amundsen en Antarctique de l'Ouest, en montrant une sensibilité importante de la dynamique de la ligne d'échouage au choix de la loi de frottement ainsi qu'aux valeurs attribuées à certains paramètres intervenant au sein des lois testées.

Mots clés : Ligne d'échouage, endommagement, frottement basal, modélisation, méthode des éléments finis

Abstract

The Antarctic ice sheet represents the world's largest potential contributor to sea level rise. Over 80 % of Antarctica's grounded ice drains through its fringing ice shelves which surround close to 45 % of the continent's shore. Because of Archimède' principle, the contribution of the ice to sea level is accounted for as soon as it flows through the grounding line, which defines the limit beyond which ice grounded on the bedrock starts floating on the ocean. Therefore, realistic modelling of grounding line dynamics is crucial to produce trustworthy projections of future sea level rise. This dynamics is affected by a number of physical processes, some of which are not properly represented in current ice flow models. This PhD thesis focuses on two of these processes : damage of ice on the one hand and basal friction related to basal hydrology on the other hand.

Damage accounts for the degradation of ice mechanical properties due to the presence of fractures and crevasses, commonly observed at the surface of glaciers. Damage affects ice flow by lowering ice viscosity. The evolution of damage is governed by a pure advection equation, the numerical resolution of which requires stabilisation methods. We show that, for numerical resolutions associated to acceptable calculation times, grounding line dynamics is sensitive to the choice of this method, which seriously complicates the modelling of damage processes.

Ice flow models account for basal friction through the use of friction laws, i.e. the mathematical relationship between basal drag and sliding velocities. Several formulations of these laws have been proposed over the last decades based on theoretical arguments. Some of these formulations explicitly include the effect of basal water which is present in the subglacial drainage system and the pressure of which eases basal motion. Unfortunately, the temporal and spatial scales at stake in glaciology make it impossible to validate these different formulations *in situ* and large-scale ice flow models usually make use of the simplest one, the Weertman law. The effect of basal water pressure is then accounted for in an implicit fashion via a friction coefficient, the spatial distribution of which is inferred through the use of inverse methods. Because the temporal evolution of this coefficient is poorly constrained, it is usual to keep it stationary. This lead to an unphysical discontinuity of friction at the grounding line when the latter retreats. First of all, we show that grounding line dynamics is sensitive to the way this discontinuity is treated numerically. Then, we demonstrate on a synthetic case that the fact of explicitly accounting for the effect of basal water pressure on basal friction leads to positive feedback phenomeno which implies larger ice losses. Finally, these conclusions are extended to a real case, the Amundsen basin in West Antarctica, by showing a significant sensitivity of grounding line dynamics to the chosen friction law as well as to the values given to some of the parameters involved in the tested friction laws.

Keywords : Grounding line, damage, basal friction, modelling, finite element method