

## **Simulation avec FreeFem++ de la formation et la fonte des glaces**

Responsables et contacts :

Ionut DANAILA (PR), [ionut.danaila@univ-rouen.fr](mailto:ionut.danaila@univ-rouen.fr),  
Georges Sadaka (IR CNRS) [georges.sadaka@univ-rouen.fr](mailto:georges.sadaka@univ-rouen.fr).

---

Période : 1<sup>er</sup> septembre 2025 – 28 février 2026.

Rémunération : suivant les grilles salariales du CNRS (en fonction de l'expérience).

---

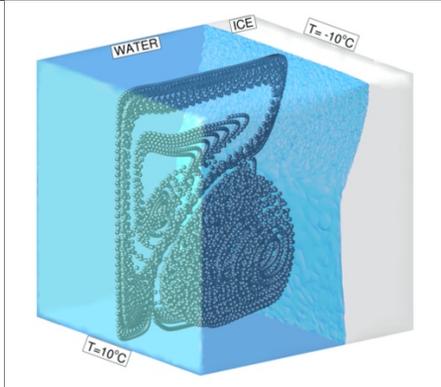
### **DESCRIPTION DU PROJET SCIENTIFIQUE**

---

Depuis 2011, nous développons au LMRS des activités en calcul numérique qui soutiennent la politique d'ouverture des mathématiques aux autres disciplines scientifiques et au monde réel (physique ou industriel). La modélisation mathématique et la simulation numérique des phénomènes à changement de phase liquide-solide est une thématique centrale dans ce contexte. Les applications abordées ont concerné exclusivement les matériaux à changement de phase, utilisés pour le stockage ou la gestion durable de l'énergie [1, 2, 3].

L'objectif de ce projet est d'adapter et enrichir cette expertise et les codes de calcul existants en abordant une thématique nouvelle pour nous : la modélisation et la simulation de la dynamique des glaces. Des études récentes sur le sujet [4 et les références citées] ont mis en évidence les limites des modèles prédictifs de la vitesse de fonte des glaces. Dans [4], les auteurs prennent en compte la géométrie particulière du glaçon pour aboutir à des modèles fiables de fonte/solidification. Les approches sont expérimentales et numériques, avec le code spectral Dedalus, qui suppose une périodicité du domaine selon deux directions spatiales.

Dans ce projet, nous proposons d'utiliser nos codes de simulation numérique 3D, afin d'étudier la dynamique de fonte/solidification d'un bloc de glace, sous l'effet combiné d'un champ dynamique (uniforme ou stratifié, laminaire ou turbulent) et d'un champ de température (uniforme ou stratifié). Ceci implique de modéliser des phénomènes fondamentaux (fonte de la glace, solidification de l'eau) que nous avons étudiés dans des configurations simples, académiques (voir les images et les films sur <http://lmrs-num.math.cnrs.fr/>). La collaboration avec les collègues géophysiciens (Rouen, laboratoire M2C) est nécessaire pour étendre les modèles et les simulations pour des cas réalistes.



Solidification de l'eau. Simulation avec FreeFem++ utilisant plus de 5 millions de degrés de liberté (224 processeurs). Séparation de la phase solide et liquide (avec lignes de courant 3D).

Nous sommes capables de simuler des configurations 3D de systèmes à changement de phase liquide-solide, en utilisant les équations de Navier-Stokes-Boussinesq pour la phase liquide et une équation d'enthalpie transformée pour la thermique. Ce modèle est complexe et difficile à résoudre numériquement, car il tient compte de la convection dans la phase liquide. Une bonne résolution de l'interface liquide-solide est requise (maillage adaptatif). Nos codes actuels sont basés sur le logiciel FreeFem++ et utilisent les bibliothèques récentes pour la décomposition de domaine et le calcul parallèle. La figure montre la formation d'un glaçon (domaine cubique), avec une dynamique complexe dans la phase liquide (cellules de convection contrarotatives). Ce type de simulation 3D est rare dans la littérature, surtout avec un maillage adaptatif.



Iceberg A86 (crédit image bbc.com/RAF).

L'ambition finale de cette activité est d'arriver à simuler des configurations réalistes, comme celle de l'A86, le plus gros iceberg du monde (60 kilomètres de long pour 6.000 km<sup>2</sup>), séparé de l'Antarctique en 2017 et disloqué en février 2020. Pour arriver à ce niveau, en passant du glaçon à l'iceberg, nous utiliserons nos codes 3D récents, parallèles basés sur FreeFem interfacé depuis peu avec la bibliothèque PETSC.

Les compétences complémentaires et multidisciplinaires nécessaires pour mener à bien ce projet sont réunies : analyse numérique et calcul scientifique (coté LMRS), modélisation multi-échelle, turbulence, thermique, modèles océanographiques (côté M2C). Une base de travail solide sera constituée par les codes de calcul 3D existants, qui tournent sur les machines du centre régional CRIANN. Ces codes permettent d'adapter dynamiquement le maillage et d'utiliser la décomposition de domaine pour optimiser le calcul parallèle.

[1] A. Rakotondrandisa, I. Danaila, L. Danaila, *Numerical modelling of a melting-solidification cycle of a phase-change material with complete or partial melting*, Int. J. of Heat and Fluid Flow, 76, p. 57-71, 2019.

[2] A. Rakotondrandisa, G. Sadaka, I. Danaila, *A finite-element toolbox for the simulation of solid-liquid phase-change systems with natural convection*, Computer Physics Communications, 253, p. 107188 (1-20), 2019.

[3] G. Sadaka, A. Rakotondrandisa, P.-H. Tournier, F. Luddens, C. Lothodé, I. Danaila, *Parallel finite-element codes for the simulation of solid-liquid phase-change systems with natural convection*, Computer Physics Communications, 257, p. 107492 (1-26), 2020.

[4] E. Hester, C. McConnochie, C. Cenedese, L.-A. Couston, G. Vasil, *Aspect ratio affects iceberg melting*, Physical Review Fluids, 6, p. 023802, 2021.