

RAPPORT DE STAGE

---

# Fracturation de floes de glace par percussion dans un modèle granulaire

---

*Étudiant*

Roussel Desmond NZOYEM

*Superviseur*

Stéphane LABBÉ

*Enseignant référent*

Christophe PRUD'HOMME



*Stage effectué au Laboratoire Jacques-Louis Lions;  
du 03 février 2021, au 31 juillet 2021;  
pour l'obtention du master 2 CSMI.*

Année académique 2020 - 2021

2 août 2021

## *Remerciements*

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte . . . . .	1
1.2 Problématique . . . . .	2
1.3 Environnement . . . . .	2
1.4 Objectifs . . . . .	2
1.5 Résumé de l'introduction en Anglais . . . . .	3
<b>2 État de l'art</b>	<b>4</b>
2.1 Position du problème . . . . .	4
2.2 Résumé de thèse de M. Rabatel . . . . .	4
2.3 Résumé de thèse de D. Balasoiu . . . . .	4
2.4 Résumé de l'Etat de l'art . . . . .	4
<b>3 Problème 1D et étude de la fracture</b>	<b>5</b>
3.1 Les différents modèles étudiés . . . . .	5
3.2 Présentation du code de calcul 1D . . . . .	5
3.3 Résumé des résultats obtenus . . . . .	5
<b>4 Problème 2D et percussion des floes de glace</b>	<b>6</b>
4.1 Présentation des travaux antérieurs . . . . .	6
4.2 Développement d'un modèle de percussion . . . . .	6
4.3 Présentation du code de calcul 1D . . . . .	6
4.4 Résumé des résultats obtenus . . . . .	6
<b>5 Déroulement et apports du stage</b>	<b>7</b>
5.1 Journal de bord . . . . .	7
5.2 Bilan et future travail . . . . .	7
5.3 Les apports du stage . . . . .	7
<b>6 Conclusion</b>	<b>8</b>
<b>A Rappels sur les EDO</b>	<b>9</b>
<b>B Le schéma Symplectique</b>	<b>10</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>11</b>



# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Contexte

Le déclin de la glace Artique ces dernières décennies est considéré comme l'une des manifestations les plus marquantes du changement climatique (voir [Str+12]). Ce déclin présente des enjeux aussi climatiques qu'industriels. Premièrement, de par son étendue et son épaisseur immense, la zone arctique est un contributeur majeur au climat à travers ses échanges de chaleurs par rayonnement et radiation avec l'atmosphère. Il est donc crucial de considérer l'évolution de la glace dans les modèles climatiques. Deuxièmement, la chute de cette couverture de glace dans la MIZ<sup>1</sup> (VOIR FIGURE) ouvre des routes maritimes facilitant l'exploitation de ses réserves d'hydrocarbures (qui restent quasiment intactes). Il est donc nécessaire de pouvoir prédire l'évolution de la banquise Artique (au moins) à court terme.

Parmi les éléments exagérant ce déclin de la glace Artique, des études ont cité l'accélération de la vitesse et de la déformation des floes<sup>2</sup> (RWDC11, SKM11). Pour la prédiction de l'évolution de la banquise, les modèles qui considèrent la glace comme un milieu continu ne sont pas adaptés, surtout à l'échelle de la MIZ. Au contraire, les modèles granulaires, bien que plus coûteux, doivent être privilégiés afin de prendre en compte la nature discontinue de la banquise et sa rhéologie<sup>3</sup>. Des modèles granulaires pour l'évolution de la glace ont été utilisés par le passé (Hop96, KS14). Cependant, les approches utilisées dans ces travaux limitent la géométrie (circulaire, rectangulaire) et le nombre de floes (de l'ordre de la centaine) et modélisent donc le contact entre floes comme une répulsion après interpénétration<sup>4</sup> (voir [Bal20, p.16]).

En 2015, M. Rabatel, S. Labbé et J. Weiss [RLW15; Rab15] ont développé un nouveau modèle granulaire prenant en compte la collision des floes sans passer par un processus d'interpénétration. Dans leur modèle, le mouvement des floes vérifie les équations de conservation du moment angulaire et de la quantité de mouvement. Le modèle prend en compte la force de Coriolis et les interactions avec l'océan et l'atmosphère. En 2020, D. Balasoiu [Bal20] développe un modèle de fracture dans le but de le coupler au modèle granulaire d'interaction préexistant, en prenant en compte le phénomène de percussion<sup>5</sup>. Les floes de glace auparavant considérés comme des corps solides dans les travaux de M. Rabatel, sont dorénavant des corps élastiques. En plus de proposer un modèle de fracture fragile pour les floes de glace, D. Balasoiu obtient l'expression du déplacement d'un floe (cette fois-ci considéré comme un réseau de masses-ressorts-dispositifs visqueux) qui est percuté par un objet ponctuel.

---

1. Marginal Ice Zone : zone de transition entre l'océan et le cœur de la banquise, où la concentration de glace est inférieure à 80%, et/ou les morceaux de glace sont de faible épaisseur ( $\approx 1m$ ) et de petite taille (10m – 100km).

2. Un floe est un morceau individuel de glace rencontré dans la MIZ

3. étudie la résistance des matériaux aux contraintes et aux déformations.

4. Les détails sur l'interpénétration sont donnés à la ...

5. Dans ce rapport, nous désignerons par percussive la série de collisions à très courts intervalles de temps entre deux ou plusieurs floes.

C'est dans ce contexte que le projet SASIP a été lancé. Il s'agit d'un projet a but de developper un nouvea modèle de glace de mer capable d'appréhender sa dynamique complexe afin d'améliorer sa représentation dans les futurs modèles de pr'diction climatiques. Cette gigantesque entreprise pilotée par l'Institut des Géosciences de l'Environnement regroupe dix partenaires internationaux parmi lesquels la France, la Norvège, les Etats-Unis d'Amérique, l'Italie, le Royaume Unis, et l'Allemagne. Ce fut un grand honneur pour mois d'intégrer ce projet dans un stage de six mois avec pour missions : prendre en main puis de poursuivre le développement du modèle de fracturation des floes existant ; intégrer ce modèle dans un code de calcul de l'évolution de la banquise à l'échelle des floes de glace.

FIGURE DES FLOES DE GLACE (ice-small-SASIP png), FIGURE 2 THESE DIMITRI, ET UNE FIGURE QUI RECAP LES TRAVAUX DE DIMITRI.

## 1.2 Problématique

Ce stage a été pour moi une opportunité d'explorer la percussion et la fracture des floes de glace. J'ai eu à développer un modèle mathématique et à l'intégrer à un projet de développement logiciel. Plus précisément, ce rapport de stage se développe au prisme de la problématique du comportement d'un matériaux élastique lors de la percussion avec un matériaux voisin. En utilisant les principes de mécanique du contact et les équation aux dérivées ordianaires (EDO), nous nous sommes intéressés à la question : **Comment le matériau se déplace-t-il après de tel(s) choc(s) ?** Nous nous somme aussi posé la question de savoir **dans quelle mesure une fracrure apparait-t-elle dans le matériau ?** Pour cette dernière tache, nous nous sommes basés sur le modèle de Griffith et de l'approche de Franckfort-Marigot.

## 1.3 Environnement

Mon stage s'est déroulé du 02 février au 31 juillet 2021 au sein du Laboratoire Jacques Louis Lions (LJLL) de Sorbonne Université, sous la supervision du Professeur Stéphane Labbé. Ce stage s'inscrit dans la continuation directe de deux thèses effectuée par Matthias Rabatel [Rab15] et Dimitri Balasiou [Bal20] au sein du Laboratoire Jean Kuntzmann de l'Université Grenoble Alpes, co-dirigées par le Professeur Stéphane Labbé, et Monsieur Jérôme Weiss, en collaboration avec le groupe TOTAL. Le LJLL a constitué un environnement idéal pour ce travail de stage de par ses membres spécialées dans divers domaines des mathématiques appliquées, et des ressources mises à ma disposition pour le remplissage de mes fonctions. Cependant, malgré la convivialité et l'esprit d'équipe régnant au sein du LJLL, j'ai du effectué certaines de mes taches en télétravail principalement du à la situation de confinement imposée en France durant cette période trouble de pandémie liée à la COVID-19.

IMAGE DU LJLL

## 1.4 Objectifs

Au vue des problème qui nous sont donné de résoudre et des travaux qui ont précédés, nos **objectifs primaires** de ce rapport de stage (ainsi que leur temps approximatif d'exécution) sont les suivants :

1. Comprendre le modèle de rupture de Griffith dans les milieux élastiques (6 semaines).
2. Comprendre le passage micro/macro du modèle élastique pour travailler sur le modèle de percussion.
3. Intégrer le modèle dans un code de calcul de l'évolution de la banquise à l'échelle des floes de glace.

Afin de remplir au mieux ces missions, nous les avons fracturé en groupes de taches singulières formant ainsi des **objectifs secondaires** étalé sur six mois (26 semaines) que sont :

- Prise en main de la notion de Gamma-Convergence en calcul des variations (effectuée avant le début du stage)

- Lecture et assimilation de la thèse de Matthias Rabatel (jusqu'au 23 février 2021)
- Lecture et assimilation de la thèse de Dimitri Balasoiu (jusqu'au 16 février 2021)
- Modéliser, simuler, et visualiser le déplacement d'un floe en une dimension (1D) après une collision (jusqu'au 30 mai 2021)
- Modéliser, simuler, et visualiser le déplacement d'un floe en deux dimension (2D) après une collision (jusqu'au 30 juin 2021)
- Implémenter le modèle de fracture de Griffith dans le modèle de collision 1D préexistant (30 juillet 2021)

En vue de rendre compte de manière fidèle et analytique des six mois passés au sein du Laboratoire Jacques-Louis Lions, il apparaît logique de présenter à titre préalable les remarquables travaux qui ont précédé ce stage (chapitre 2); puis de présenter les différents modèles de glace de mer développés et étudiés en 1D (chapitre 3); ensuite en 2D (chapitre 4). Enfin, à l'aide d'un journal de bord, il sera précisé les différentes tâches que j'ai pu effectuer, et les nombreux apports que j'ai pu en tirer (chapitre 5).

## 1.5 Résumé de l'introduction en Anglais

## **Chapitre 2**

# **État de l'art**

### **2.1 Position du problème**

### **2.2 Résumé de thèse de M. Rabatel**

### **2.3 Résumé de thèse de D. Balasoiu**

### **2.4 Résumé de l'Etat de l'art**



## **Chapitre 3**

# **Problème 1D et étude de la fracture**

### **3.1 Les différents modèles étudiés**

### **3.2 Présentation du code de calcul 1D**

DIAGRAMME UML ET README DU REPOSITORY

### **3.3 Résumé des résultats obtenus**

## **Chapitre 4**

# **Problème 2D et percussion des floes de glace**

### **4.1 Présentation des travaux antérieurs**

### **4.2 Développement d'un modèle de percussion**

### **4.3 Présentation du code de calcul 1D**

### **4.4 Résumé des résultats obtenus**

## Chapitre 5

# Déroulement et apports du stage

### 5.1 Journal de bord

### 5.2 Bilan et future travail

RÉSUMÉ DÉTAILLÉ DES TRAVAUX DE STAGE, ET TRAVAIL RESTANT

### 5.3 Les apports du stage

LES OUTILES ET LES RESSOURCES UTILISÉS ENTRENT ICI.

- L' utilisation de TIKZ
- La maitrise de Flask
- Optimiser mes codes (1D et 2D) avec Cpython

## **Chapitre 6**

## **Conclusion**

## **Annexe A**

# **Rappels sur les EDO**

## **Annexe B**

# **Le schéma Symplectique**

EXPLICATION DU MODULE SCIPY INTEGRATE

# Bibliographie

- [Bal20] Dimitri BALASOIU. « Modélisation et simulation du comportement mécanique de floes de glace ». Theses. Université Grenoble Alpes [2020-....], oct. 2020. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03116132>.
- [Rab15] Matthias RABATEL. « Modélisation dynamique d'un assemblage de floes rigides ». Theses. Université Grenoble Alpes, nov. 2015. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01293341>.
- [RLW15] Matthias RABATEL et al. « Dynamics of an assembly of rigid ice floes ». In : *Journal of Geophysical Research : Oceans* 120.9 (2015), p. 5887-5909.
- [Str+12] Julianne C STROEVE et al. « Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations ». In : *Geophysical Research Letters* 39.16 (2012).