

# Estimation des volumes d'icebergs qui se retournent : modélisation mécanique et analyse de signaux sismiques

**P. BONNET**<sup>a b c</sup>, **V. YASTREBOV**<sup>c</sup>, **A. MANGENEY**<sup>a d e</sup>, **O. CASTELNAU**<sup>b</sup>, **P. QUEUTEY**<sup>f</sup>, **A. LEROYER**<sup>f</sup>, **A. SERGEANT**<sup>g</sup>, **E. STUTZMANN**<sup>a</sup>, **J-P. MONTAGNER**<sup>a</sup>

- a. Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Seismology Group, CNRS UMR 7154, Paris, France, pbonnet@ipgp.fr, anne.mangeney@gmail.com, stutz@ipgp.fr, jpm@ipgp.fr  
b. Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux, CNRS, ENSAM, CNAM, Paris, France, olivier.castelnaud@ensam.eu  
c. MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87, Evry, France, vladislav.yastrebov@mines-paristech.fr  
d. Université Paris-Diderot 7, Sorbonne Paris Cité, UFR STEP, Paris, France  
e. INRIA, Laboratoire J.-L. Lions, ANGE team, CNRS, Paris, France  
f. Laboratoire LHEEA, METHRIC Team, CNRS UMR 6598, Centrale Nantes, France, patrick.queutey@ec-nantes.fr, alban.leroy@ec-nantes.fr  
g. ETH Zurich, Laboratoire of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), Zurich, Switzerland, amandine.sboy@gmail.com

## Résumé : (16 gras)

*Une des questions principales en sciences du climat est l'amélioration de la précision des prédictions du niveau des océans. En particulier, les incertitudes dépendent de la quantification de la perte de masse des calottes polaires comme celle du Groenland. Le détachement d'icebergs au front des glaciers du Groenland représente jusqu'à la moitié des pertes de masses aux terminus de ces glaciers. Certains icebergs qui se détachent des glaciers du Groenland ont la même hauteur que le terminus du glacier, sont fins donc instables et se retournent proche du glacier. Ils exercent ainsi une force sur le glacier qui crée un signal sismique enregistré sur des stations situées au Groenland ou plus loin. Le nombre d'évènements de ce type a augmenté et la distribution spatiale de ces évènements a évolué [1]. Qu'en est-il de l'évolution du volume de ces icebergs qui se retournent ?*

*Les données de terrain sur ces évènements sont rares, à l'exception des données sismiques qui donnent des informations continues sur les évènements de retournement d'icebergs. Les caractéristiques du signal sismique dépendent du volume de l'iceberg et de toute la dynamique du retournement [2]. Le but ultime de ce travail est de calculer les volumes des icebergs qui se retournent. Pour ce faire, nous comparons des signaux sismiques enregistrés à des signaux sismiques synthétiques obtenus à l'aide d'un modèle mécanique de retournement d'iceberg [3]. Ainsi, nous résolvons un problème inverse pour obtenir des informations sur la dynamique du retournement et une estimation du volume des icebergs [4]. Nous nous intéressons, dans cet article, à la modélisation mécanique du retournement d'un iceberg. La dynamique du retournement d'un iceberg dépend de phénomènes complexes : les interactions entre*

*l'iceberg, l'eau et le glacier, le frottement entre le glacier et le lit rocheux, la déformation élasto-viscoplastique de la glace. Résoudre les équations de la mécanique des fluides, du mouvement solide et les équations de contacts solides est très coûteux, même en deux dimensions, et peu adapté à la génération d'un catalogue pour résoudre un problème inverse. Ainsi, un modèle mécanique simplifié de retournement d'iceberg dans l'eau a été développé sous quelques hypothèses. Le modèle proposé, nommé SAFIM (modèle semi-analytique d'un iceberg flottant) tient compte de la dynamique des fluides via la pression hydrostatique, une pression de traînée et des masses ajoutées. Ce modèle SAFIM a été validé à partir d'un modèle de mécanique des fluides numérique ISIS-CFD qui résoud la dynamique d'un fluide à surface libre en interaction avec un solide. L'erreur sur la force horizontale du fluide sur l'iceberg qui se retourne dans un océan infini (sans contact avec le glacier) calculée avec SAFIM est de l'ordre de 4% à 20%, et le coefficient de traînée qui minimise cette erreur varie entre 1 et 3, en fonction du rapport d'aspect de l'iceberg.*

## **Abstract : (16 gras)**

*One main concern in climate science is to reduce uncertainties on sea level predictions. In particular, these uncertainties depend on the quantification of the mass losses of polar ice caps including Greenland ice sheet. Iceberg calving at Greenland glaciers accounts for up to half of ice losses at glacier termini. Some icebergs detaching from Greenland glaciers have the height of the glacier and are thin so unstable and capsizes exerting a force on the glacier front which generates a seismic wave recorded at stations in Greenland and further away. These seismic signals have been recorded for the last twenty-five years by the permanent stations. The number of such events has increased and the spatial distribution has evolved. What is the evolution of the volume of capsizing icebergs ?*

*Field data on capsizing icebergs are lacking, except for seismic data. Indeed, the database of seismic signals gives continuous information about iceberg capsizing events : we aim to extract information from these data. The characteristics of seismic signals depend on the iceberg volume and the whole dynamic of the capsizing iceberg [2]. The global aim of this work is to calculate the volume of capsizing icebergs. To do this, we compare recorded seismic signals to synthetic seismic signals calculated using a model of iceberg capsizing. Therefore, we solve an inverse problem to obtain information on the dynamic of the capsizing and in particular an estimation of the volume of the iceberg.*

*Iceberg capsizing dynamics depends on complex phenomena : iceberg-water interactions, iceberg-glacier friction, glacier-sea floor friction, elasto-viscoplastic deformation of ice. Solving directly fluid flow, solid motion, and contact equations even in two dimensions is very costly and can hardly be used to generate catalogs and to solve inverse problem. Therefore, a simplified mechanical model of a capsizing iceberg in water has been developed based on few assumptions. The proposed model, named SAFIM (semi-analytical floating iceberg model) accounts for sea hydrodynamics only through hydrostatic pressure, pressure drag, and added mass, and it has been validated based on a separate state-of-the-art Computational Fluid Dynamics code which can handle free surface and arbitrary iceberg configurations. The error on the horizontal force exerted by the fluid on the iceberg capsizing in open ocean (with no contact with the glacier) calculated with SAFIM goes from 4% to 20%, and the drag coefficient that minimizes this error goes from 1 to 3, depending on the aspect ratio of the iceberg.*

**Mots clefs : interaction fluide structure, masse ajoutée, pression de traînée,**

## icebergs, vagues

### 1 Introduction (16 gras)

Pour inverser les volumes d'icebergs, nous couplons une analyse sismologique des signaux [3] à une modélisation mécanique de la force horizontale qu'exerce l'iceberg sur le front du glacier. La comparaison de ces signaux (filtrés dans la gamme de fréquence sismique) dans le domaine temporel et fréquentiel, permet l'inversion du volume de l'iceberg [4]. La dynamique du retournement de l'iceberg est modélisée avec des éléments finis pour des solides déformables et des contact entre solides par le logiciel Zset [5]. Les équations de la mécanique des fluides n'y sont pas résolues. Nous proposons alors de représenter les efforts du fluide sur l'iceberg à l'aide d'un modèle simple SAFIM. Nous proposons de valider le modèle SAFIM à l'aide d'un modèle de mécanique des fluides numérique de référence, le code ISIS-CFD [6] qui résout les équations de Navier-Stokes pour des écoulements turbulents à surface libre en interaction avec un solide non déformable. Ce modèle ne traite pas les contacts entre les solides. Ainsi, nous comparons les résultats de SAFIM et de ISIS-CFD pour la modélisation d'un iceberg indéformable qui se retourne sans contact avec le glacier.

Nous présentons ici le modèle de référence ISIS-CFD et le nouveau modèle SAFIM puis l'étude du retournement d'un iceberg libre dans un océan infini, et la recherche des paramètres de SAFIM qui minimisent l'erreur avec ISIS-CFD.

## 2 Présentation des modèles ISIS-CFD et SAFIM

### 2.1 Le modèle de mécanique des fluides numérique : ISIS-CFD

Le modèle de mécanique des fluides numérique ISIS-CFD résout les équations de Navier-Stokes par la méthode de la moyenne de Reynolds (RANSE), pour des écoulements turbulents à surface libre en interaction avec un solide non déformable [7]. Le maillage est adaptatif et repose sur l'emploi d'interface glissantes pour connecter des maillages non-conformes : le maillage fin autour de l'iceberg et le maillage global raffiné à la surface. Le calcul de l'interaction fluide-structure est réalisé au sein d'une boucle non-linéaire du solveur fluide. Ce couplage est stabilisé par une méthode de relaxation basée sur l'évaluation dynamique de la matrice de masse ajoutée au cours de la simulation [8].

### 2.2 Le modèle de mécanique des solides : SAFIM

Un modèle global du glacier - lit rocheux - iceberg - océan a été développé avec le logiciel éléments finis Zset [10]. Le retournement de l'iceberg est contraint par le mouvement turbulent du fluide ([3]), avec un nombre de Reynolds  $Re \approx 10^{10}$  à l'échelle terrain. Plusieurs modèles ont été proposés pour les efforts du fluide sur l'iceberg : avec des masses ajoutées [11] ou avec une force de traînée [12]. Les équations générales de la dynamique du retournement d'un iceberg rigide libre dans l'océan, rectangulaire de hauteur  $H$  largeur  $W = H\epsilon$  (figure 1a) et longueur  $L$  dans la troisième direction, sont données ci-dessous. Les forces fluides sont modélisés par : une force et un moment  $F_s$  et  $M_s$  dues à la pression hydrostatique, des masses ajoutées non couplées  $m_{xx}^a$ ,  $m_{zz}^a$  et  $m_{\theta\theta}^a$ , des masses ajoutées couplées  $m_{xz}^a = m_{zx}^a$ ,  $m_{z\theta}^a = m_{\theta z}^a$  et  $m_{\theta x}^a = m_{x\theta}^a$  et des efforts hydrodynamiques  $F_d$  et  $M_d$ .

$$(m_{iceberg} + m_{xx}^a)\ddot{x} + m_{xz}^a\ddot{z} + m_{x\theta}^a\ddot{\theta} = \mathbf{F}_d \cdot \mathbf{e}_x \quad (1a)$$

$$(m_{iceberg} + m_{zz}^a)\ddot{z} + m_{zx}^a\ddot{x} + m_{z\theta}^a\ddot{\theta} = (\mathbf{F}_g + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_d) \cdot \mathbf{e}_z \quad (1b)$$

$$(I_{iceberg} + m_{\theta\theta}^a)\ddot{\theta} + m_{\theta z}^a\ddot{z} + m_{\theta x}^a\ddot{x} = (\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_d) \cdot \mathbf{e}_y \quad (1c)$$

Avec  $I_{iceberg} = \rho_i H W (H^2 + W^2)$ .

Les modèles de la dynamique du retournement d'un iceberg ([11], [12], [3], [15]) prennent en compte la force et le moment dues à la pression hydrostatique :

$$\mathbf{F}_s = - \int_{\Gamma_s} \rho_w g z \mathbf{n} d\Gamma_s \quad (2a)$$

$$\mathbf{M}_s = - \int_{\Gamma_s} \rho_w g z (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times \mathbf{n} d\Gamma_s \quad (2b)$$

avec  $\rho_w$  la densité de l'eau, supposée homogène dans l'océan,  $\mathbf{r}$  la position d'un point de la surface submergée de l'iceberg  $\Gamma_s$ ,  $\mathbf{n}$  la normale sortante à la surface en ce point et  $\mathbf{r}_0$  la position du centre de gravité G de l'iceberg.

Un premier modèle de retournement d'iceberg proposé par [11], comporte des masses ajoutées dites non couplées selon  $x$  et  $z$  :

$$m_{xxT_{sai}}^a = \frac{1.5\pi}{4} \rho_w L (H^2 \cos(\theta)^2 + W^2 \sin(\theta)^2) \quad (3a)$$

$$m_{\theta\theta T_{sai}}^a = \frac{L}{24} \rho_w (H^2 - L^2)^2 \quad (3b)$$

Un autre modèle de retournement d'iceberg proposé par [12] comporte des efforts de traînée :

$$\mathbf{F}_{d_{Burton}} \cdot \mathbf{e}_x = \nu_x |\dot{x}|^2 \text{sign}(\dot{x}) \quad (4a)$$

$$\mathbf{F}_{d_{Burton}} \cdot \mathbf{e}_z = \nu_y |\dot{z}|^2 \text{sign}(\dot{z}) \quad (4b)$$

$$\mathbf{M}_{d_{Burton}} \cdot \mathbf{e}_\theta = \nu_z |\dot{\theta}|^2 \text{sign}(\dot{\theta}) \quad (4c)$$

Pour un iceberg sans accélération initiale [11] ou sans vitesse [12] initiale, ces modèles ne prédisent aucune force horizontale. Notre objectif étant de modéliser au mieux les efforts horizontaux du fluide sur l'iceberg, nous proposons un autre modèle qui permet la représentation de ces efforts horizontaux. Ce modèle a été proposé par [3], nous proposons ici des améliorations de ce modèle ainsi qu'une validation.

Le modèle de traînée de SAFIM se distingue des modèles présentés dans la littérature car il propose une formule intégrée de la traînée sur la surface submergée de l'iceberg :

$$\mathbf{F}_{d_{SAFIM}} = -\alpha_d \frac{1}{2} \int_{\Gamma_s} \rho_w v_n^2 \text{sign}(v_n) \mathbf{n} d\Gamma \quad (5a)$$

$$\mathbf{M}_{d_{SAFIM}} = -\alpha_d \frac{1}{2} \int_{\Gamma_s} v_n^2 \text{sign}(v_n) (\mathbf{u}) \times \mathbf{n} d\Gamma \quad (5b)$$

	$\epsilon$	$\Delta z_0[m]$	no AM		$AM_{ISIS}$		$AM_{SAFIM}$				
			Error	$\alpha_d$	Error	$\alpha_d$	Error	$\alpha_d$	$C_{xAM}$	$C_{zAM}$	$C_I$
T1	0.25	0	4.0%	1	16.3%	1	3.6%	1	0.	0.	0.1
T2	0.25	10	12.8%	1	14.6%	0.9	12.3%	1.5	0.	0.	0.6
T3	0.5	0	19.4%	3	32.9%	0.2	19.4%	3	0.	0.	0.

TABLE 1 – Description des cas d'étude et résultats des comparaisons : norme  $\mathcal{L}^2$  de l'erreur, coefficient de traînée  $\alpha_d$  pour SAFIM sans masse ajoutée ("no AM"), avec  $AM_{ISIS}$  ou avec  $AM_{SAFIM}$

avec  $\mathbf{n}$  la normale à un point de la surface submergée de l'iceberg et  $v_n = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$  la vitesse normale de ce point.

Le modèle SAFIM comprend deux options pour les masses ajoutées.

La première option pour la masse ajoutée consiste en des valeurs de masses ajoutées obtenues à l'aide de la résolution des équations de la mécanique des fluides autour de l'iceberg avec des accélérations infinitésimales de l'iceberg. Ces masses ajoutées, calculées par ISIS-CFD pour l'iceberg à différentes positions (profondeur du centre de gravité et angle d'inclinaison de l'iceberg) constituent une base de données  $AM_{ISIS}$ . On note ces masses ajoutées :  $m_{xx}^a$ ,  $m_{zz}^a$ ,  $m_{\theta\theta}^a$ ,  $m_{xz}^a$ ,  $m_{z\theta}^a$ ,  $m_{x\theta}^a$ .

La deuxième option pour la masse ajoutée consiste en des formules analytiques (inspirées des formules pour un solide en oscillation autour de sa position d'équilibre [9]) pour chacune des trois masses ajoutées non-couplées, et qui sont fonction de la hauteur effective  $H_{eff}$  et longueur effective  $L_{eff}$  (figure 1a) de la partie submergée de l'iceberg  $AM_{SAFIM}$  :

$$m_{xx}^a = C_x \pi \rho_w H_{eff}^2 \quad (6a)$$

$$m_{zz}^a = C_z \pi \rho_w \left(\frac{W_{eff}}{2}\right)^2 \quad (6b)$$

$$m_{\theta\theta}^a = C_\theta \pi \rho_w \frac{H^4}{2} \quad (6c)$$

Les masses ajoutées couplées sont prises égales à zéro :  $m_{xz}^a = 0$ ,  $m_{z\theta}^a = 0$ ,  $m_{x\theta}^a = 0$ .

La force de traînée SAFIM comprend un paramètre ajustable  $\alpha_d$  et les masses ajoutées SAFIM comprennent trois paramètres ajustables  $C_x$ ,  $C_z$ ,  $C_\theta$ . Les masses ajoutées ISIS-CFD n'ont pas de paramètre ajustable. La comparaison du modèle SAFIM avec le modèle de référence ISIS-CFD permet de choisir les valeurs de ces paramètres.

### 3 Comparaison des modèles SAFIM et ISIS-CFD

#### 3.1 Cas étudiés et sorties d'intérêt des modèles de retournement d'iceberg

Le modèle SAFIM doit satisfaire les points suivants : (1) bien reproduire la force horizontale exercée par l'eau sur l'iceberg au court de son retournement, (2) être facile à implémenter dans un code élément fini (Zset) et (3) s'adapter à différentes géométries d'icebergs. Nous comparons la force horizontale qui s'applique sur un iceberg (figure 1b) qui se retourne librement dans l'océan (position initiale de l'iceberg

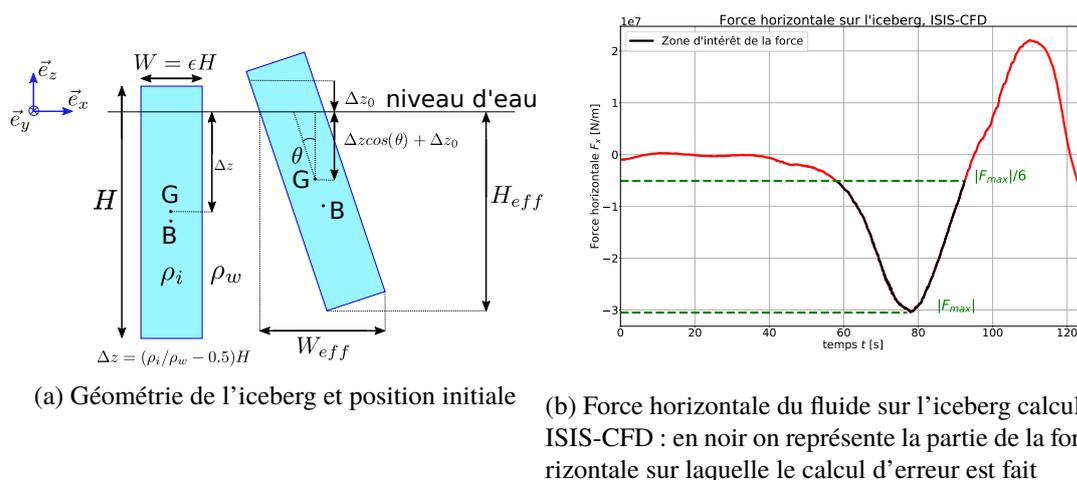


FIGURE 1 – Géométrie de l'iceberg (a) et force étudiée (b)

représentée à droite dans la figure 1a) calculée avec SAFIM et avec ISIS-CFD, pour plusieurs géométries d'icebergs.

Les icebergs qui se retournent proche des glaciers du Groenland ont un volume de l'ordre du  $km^3$  [4]. Les modèles de la dynamique de retournement d'icebergs sont indépendants de la hauteur de l'iceberg. On prendra ici la hauteur de l'iceberg étudié en détail dans [2] :  $H = 800m$ . Les masses volumiques utilisés ici sont les valeurs typiques [3] : pour l'eau  $\rho_w = 1025kg/m$  et pour l'iceberg  $\rho_i = 917kg/m$ . Par ailleurs, un bloc rectangulaire est instable en-dessous d'une valeur du rapport d'aspect  $\epsilon_c = \sqrt{6\rho_i \frac{\rho_i - \rho_w}{\rho_w}} = 0.75$  [13] : on étudiera des icebergs instables i.e.  $\epsilon < \epsilon_c$ .

Les cas d'étude (tableau 1) sont des icebergs de forme rectangulaire en deux dimensions, de hauteur  $H = 800m$ , inclinés initialement par rapport à la verticale de  $\theta = 2^\circ$ . Les icebergs T1 et T2 ont la même géométrie  $\epsilon = 0.25$  i.e.  $W = 200m$ , mais des conditions initiales différentes avec  $\Delta z_0 = 0m$  pour T1, i.e. iceberg initialement à l'équilibre hydrostatique dans sa position inclinée et  $\Delta z_0 = 10m$  pour T2, i.e. iceberg initialement soulevé de  $10m$  au dessus de sa position (inclinée) à l'équilibre hydrostatique. L'iceberg T3 est plus large  $\epsilon = 0.5$  i.e.  $W = 400m$  et initialement à l'équilibre hydrostatique dans sa position inclinée  $\Delta z_0 = 0m$ .

### 3.2 Force horizontale exercée par le fluide sur l'iceberg

Dans le but d'étudier les signaux sismiques générés par la force de contact entre l'iceberg et le glacier, seule la partie où l'iceberg est en contact avec le glacier nous intéresse, c'est à dire, les premiers instants du retournements [14]. On analysera la partie non grisée de la figure 2.

La force horizontale calculée par ISIS-CFD (en rouge sur la figure 2) est nulle pendant les 40 premières secondes puis décroît pendant environ 40 secondes et puis croît pendant une vingtaine de secondes jusqu'à atteindre zéro.

La force horizontale est nulle pour le modèle SAFIM sans force de traînée ("SAFIM no drag" en magenta) et pour les modèles de la littérature donnés dans les equations 3 et 4 ("Modèles précédents" en rose pointillé). La force horizontale calculée par le modèle SAFIM avec force de traînée et sans masse ajoutée (no AM, en gris) a une allure similaire à la force ISIS-CFD mais la portion nulle initiale est plus courte

(une vingtaine de seconde), ce qui décale d'autant la portion négative de la courbe. En translatant d'une vingtaine de secondes la force SAFIM sans masse ajoutée ("no AM, translation" en noir) les courbes coïncident. La courbe SAFIM avec une inertie ajoutée ( $C_x, C_z, C_\theta$ ) = (0, 0, 0.75) (en bleu pointillé) donne la bonne durée de la partie initiale nulle et le bon instant du premier extremum (autour de 78 secondes) - en d'autres termes, l'inertie ajoutée ralentit la mise en rotation de l'iceberg - mais l'amplitude de cet extremum est sous estimée  $-4.26 * 10^7 N/m$  contre  $-4.3 * 10^7 N/m$  prédit par ISIS-CFD.

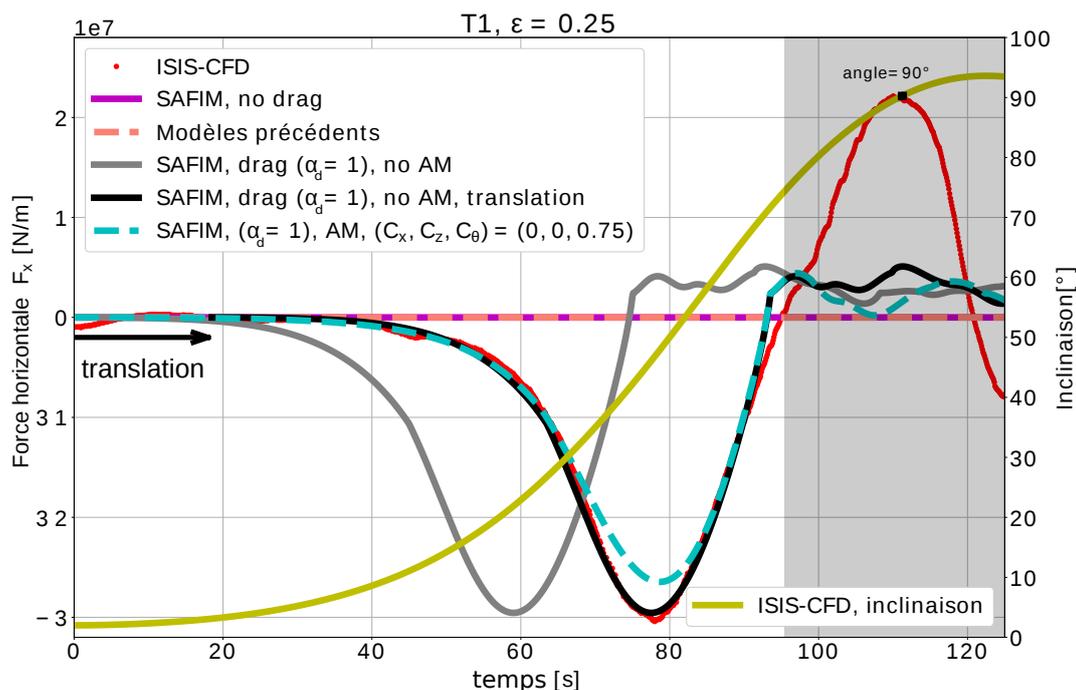


FIGURE 2 – Exemple de la force horizontale qui s'applique sur l'iceberg pour différents modèles, et angle d'inclinaison de l'iceberg par rapport à sa position initiale

### 3.3 Minimisation de l'erreur sur la force

Nous minimisons l'erreur (avec la norme  $\mathcal{L}^2 \int_t (|F_{x_{ISIS}}(t) - F_{x_{SAFIM}}(t)|^2)$  sur la partie de la force qui nous intéresse (figure 2) : les valeurs des paramètres et l'erreur correspondante sur la force sont indiquées dans le tableau 1). Nous minimisons pour des valeurs de  $\alpha_d$  dans [0.5, 1., 1.5, 2., 2.5, 3., 3.5, 4., 4.5], et des valeurs pour chacune des masses ajoutées  $C_x, C_z, C_\theta$  dans [0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8].

Le modèle SAFIM avec force de traînée et sans masses ajoutées donne une erreur de 4.0% pour T1, 12.8% pour T2 et 19.4% pour T3; et des coefficients de traînée  $\alpha_d$  de 1 pour T1, 1 pour T2 et 3 pour T3. Notons que le coefficient de traînée est le même pour les cas T1 et T2 i.e. pour une même géométrie (mais un  $\Delta z_0$  différent).

L'erreur diminue légèrement en avec des masses ajoutées SAFIM pour les géométries T1 et T2 par rapport au cas sans masses ajoutées. Pour T3, le meilleur modèle est le cas sans masses ni inerties ajoutées. Le modèle SAFIM avec les masses ajoutées ISIS présente une erreur plus importante pour les trois cas 16.3% pour T1, 14.6% pour T2 et 19.4% pour T3.

On trace la force horizontale au cours du temps pour le modèle SAFIM sans masses ajoutées, pour le modèle SAFIM avec des masses ajoutées ISIS et pour le modèle SAFIM avec des masses ajoutées SAFIM pour les cas T1 (fig 3), T2 (fig 4) et T3 (fig 5). On remarque que pour les trois géométries T1, T2 et T3, le modèle SAFIM avec masses ajoutées ISIS ajoute un second pic négatif très important à  $t=103s$  environ et qui est dû aux termes de masses ajoutées couplées.

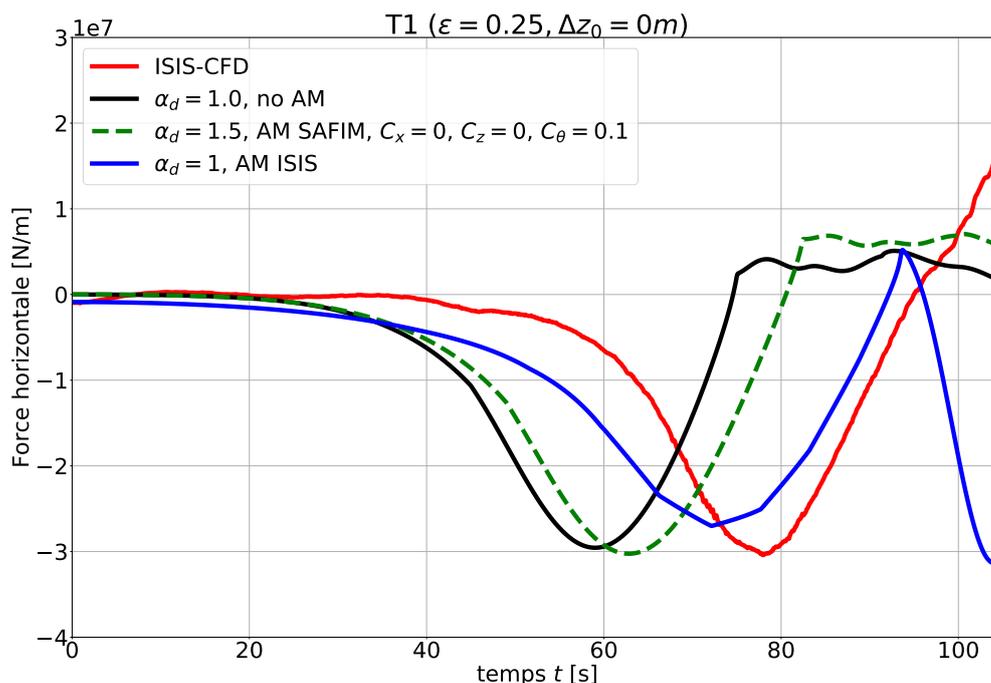


FIGURE 3 – Force horizontale qui s’applique sur l’iceberg après choix des paramètres

## 4 Conclusions et perspectives

Nous avons présenté les résultats d’un nouveau modèle pour la dynamique du retournement d’un iceberg dans l’eau et pour plusieurs géométries à l’échelle du terrain. L’erreur sur la force horizontale vaut entre 4% et 20% selon la valeur du rapport d’aspect de l’iceberg, et le coefficient de traînée varie avec la géométrie de l’iceberg de  $\alpha_d = 1$  à  $\alpha_d = 3$ .

Dans le but de calculer des volumes d’icebergs à l’aide de signaux sismiques, nous devons produire un catalogue de forces simulées et les comparer aux forces obtenues à l’aide des signaux sismiques. Ce catalogue de forces simulées doit contenir une grande variété de géométries d’icebergs représentatifs des géométries sur le terrain. Ainsi, il serait judicieux de comparer le modèle SAFIM et le modèle ISIS-CFD sur d’autres géométries d’iceberg pour plus de précision sur l’erreur faite avec chaque géométrie et pour plus de précision sur le choix des paramètres du modèle.

Une fois que les paramètres de SAFIM auront été choisis pour toutes les géométries nécessaires, il s’agira d’implémenter le code SAFIM dans le code éléments finis Zset. Remarquons ici que le choix du modèle SAFIM sans masses ajoutées permet de simplifier grandement cette étape. En effet, l’implémentation de masses ajoutées dans un code éléments finis nécessite une répartition adéquate des masses ajoutées

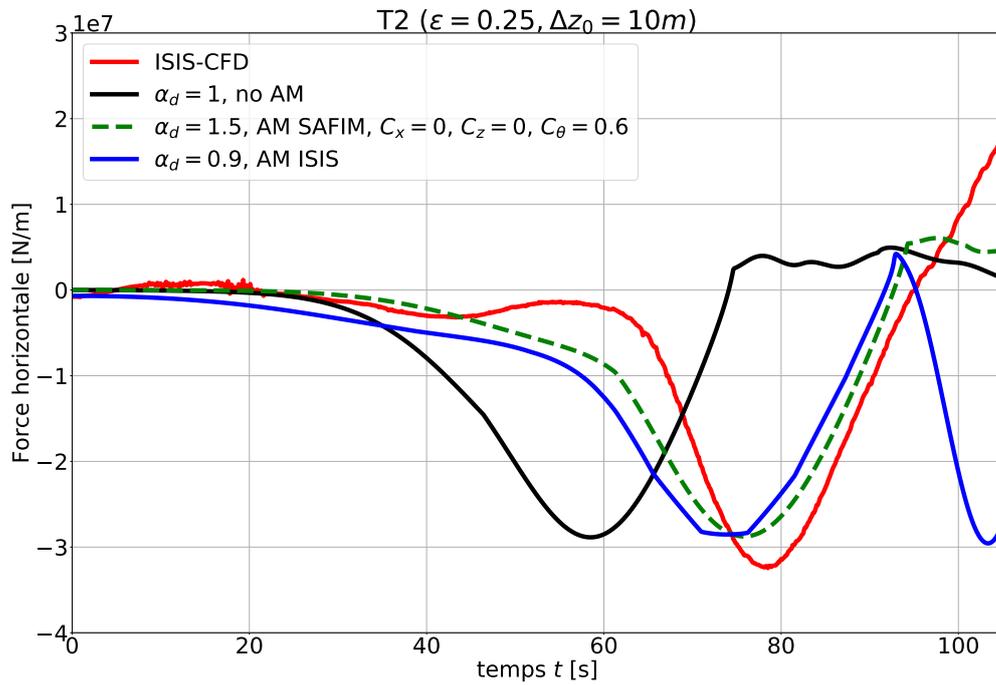


FIGURE 4 – Force horizontale qui s’applique sur l’iceberg après choix des paramètres

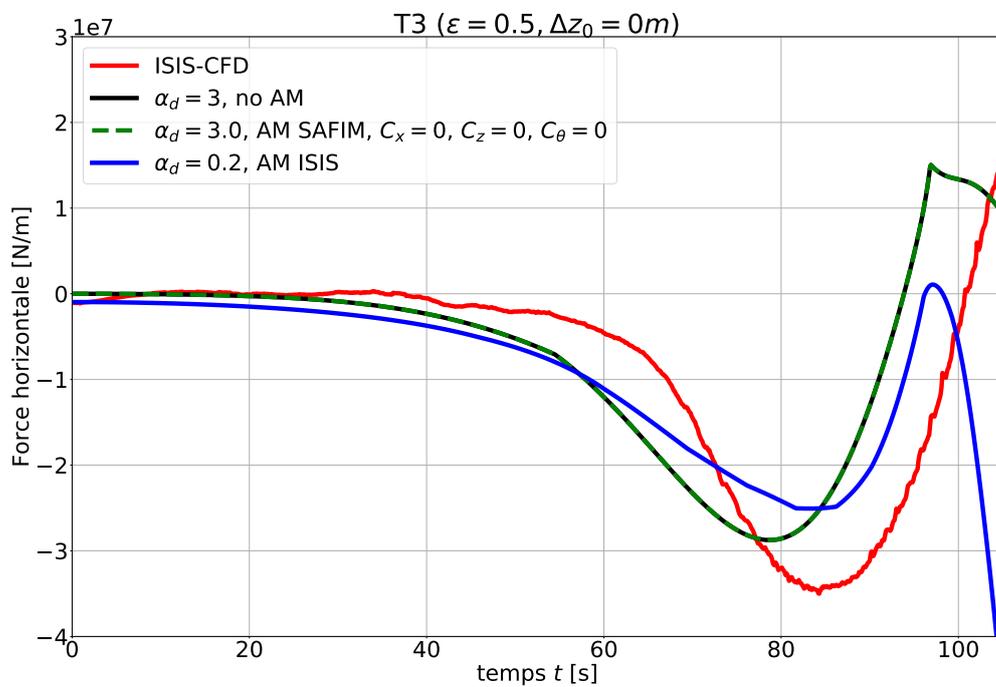


FIGURE 5 – Force horizontale qui s’applique sur l’iceberg après choix des paramètres

(ou de la masse de l'iceberg) pour permettre l'existence d'une inertie ajoutée telle que déterminée par la minimisation de l'erreur.

## 5 Remerciements

Nous remercions l'Agence de l'innovation de défense de la Direction Générale de l'Armement, l'école doctorale STEP'UP, le projet ERC SLIDEQUAKES, l'IPGP - Université de Paris, le Centre Des Matériaux de Mines ParisTech, le laboratoire PIMM des Arts et Métiers ParisTech, et le laboratoire LHEEA de Centrale Nantes qui ont permis ce travail.

## Références

- [1] Olsen, K. G., Nettles, M. Patterns in glacial-earthquake activity around Greenland, *Journal of Glaciology*, 2011 – 13, 63, 1077–1089, (2017)
- [2] Sergeant, A., Mangeney, A., Stutzmann, E., Montagner, J. P., Walter, F., Moretti, L., Castelnau, O. Complex force history of a calving-generated glacial earthquake derived from broadband seismic inversion, *Geophysical Research Letters*, 43(3), 1055–1065, (2016)
- [3] Sergeant, A., Yastrebov, V., Mangeney, A., Castelnau, O., Montagner, J. P., Stutzmann, E. Numerical Modeling of Iceberg Capsizing Responsible for Glacial Earthquakes, *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 123(11), 3013–3033, (2018)
- [4] Sergeant, A., Mangeney, A., Yastrebov, V., Walter, F., Montagner, J. P., Castelnau, O., Stutzmann, E., Bonnet, P., Ralaiarisoa, V. J.-L., Bevan, S., Luckman, A. Monitoring Greenland ice-sheet buoyancy-driven calving discharge using glacial earthquakes, *Annals of Glaciology*, (2019)
- [5] <http://www.zset-software.com/products/zebulon/>
- [6] <https://lheea.ec-nantes.fr/software-and-patents/isis-cfd-193387.kjsp>
- [7] Queutey, P., Visonneau, M. An interface capturing method for free-surface hydrodynamic flows. *Computers and Fluids*. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2006.11.007> (2007).
- [8] Yvin, C., Leroyer, A., Visonneau, M., Queutey, P. Added mass evaluation with a finite-volume solver for applications in fluid–structure interaction problems solved with co-simulation. *Journal of Fluids and Structures*, 10.1016/j.jfluidstructs.2018.05.008 (2018).
- [9] Kurt Wendel Hydrodynamic Masses and hydrodynamic moments of inertia Navy Department, The David W. Taylor model basin (1950)
- [10] Sergeant, A. Analyse et modélisation des ondes sismiques générées lors des séismes glaciaires induits par le vélage d'icebergs Thèse de doctorat en Sciences de la Terre. Géophysique (2016)
- [11] Tsai, V. C., Rice, J. R., Fahnestock, M. Possible mechanisms for glacial earthquakes. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 113(3), 1–17, (2008)
- [12] Burton, J. C., Amundson, J. M., Abbot, D. S., Boghosian, A., Cathles, L. M., Correa-Legisos, S., Darnell, K. N., Guttentberg, N., Holland, D. M., MacAyeal, D. R. Laboratory investigations of iceberg capsize dynamics, energy dissipation and tsunamigenesis. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 117(1), 1–13, (2012).
- [13] MacAyeal, D. R., Scambos, T. A., Hulbe, C. L., Fahnestock, M. A. Catastrophic ice-shelf break-up by an ice-shelf-fragment-capsizing mechanism. *Journal of Glaciology*, 49(164), 22–36. (2003).

- [14] Amundson, J. M., Burton, J. C., Correa-Legisios, S. Impact of hydrodynamics on seismic signals generated by iceberg collisions. *Annals of Glaciology*, 53(60), 106–112. (2012).
- [15] Bonnet, P., Yastrebov, V., Leroyer, A., Queutey, P., Mangeney, A., Castelnau, O., Sergeant, A., Stutzmann, E., Montagner, J. P. Mechanical modeling of a capsizing body in free ocean : insights from a full CFD model ISIS-CFD and comparison to a semi-analytical model SAFIM (In Prep)