

## Modélisation du détachement de la glace en environnement moteur sur composants tournants

D. Nezzar<sup>1,3</sup>, J. Rannou<sup>1</sup>, L. Bennani<sup>2</sup>, P. Villedieu<sup>2</sup>  
M. Balland<sup>3</sup>, C. Venuat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ONERA/DMAS - Université Paris-Saclay, F-92322 Châtillon, France, dorian.nezzar@onera.fr

<sup>2</sup> ONERA/DMPE - Université de Toulouse, F-31055 Toulouse, France

<sup>3</sup> Safran Aircraft Engines, F-77550, Moissy-Cramayel, France

**Résumé** — Cet article a pour but de présenter une méthodologie de simulation du détachement du givre d'accrétion sous l'effet de forces centrifuges sur moteur d'avion dans un cadre industriel. L'objectif est de déterminer la taille des blocs de glace détachés et de démontrer la faisabilité d'une telle méthode dans un cas en 3D. Ce travail s'appuie sur des données matériaux issus de la littérature et de projets récents portant sur la caractérisation des propriétés adhésives et cohésives de la glace accrétée sur un substrat. Les simulations sont réalisées via le code éléments finis Z-set [1] avec l'utilisation d'un modèle champ de phase couplé à un modèle de zones cohésives afin de capturer des fissures dans le volume de la glace, à l'interface glace/substrat ou selon des modes mixtes.

**Mots clés** — Givrage, Mécanique de la rupture, Modèle champ de phase, Modèle de zones cohésives.

### 1. Introduction

Le givrage en aéronautique est considéré comme l'un des phénomènes les plus critiques pour un moteur d'avion. La formation de glace est causée par l'impact de gouttelettes d'eau surfondue, qui gèlent à l'impact de certaines surfaces exposées à un flux d'air. Dans le cas d'un moteur, la glace peut s'accumuler sur ses composants en rotation et se détacher sous l'effet des forces centrifuges. Cela peut endommager le moteur car la glace ainsi détachée peut impacter d'autres composants de la turbomachine ou créer des phénomènes de vibration résultant d'un balourd causé par la glace résiduelle non détachée. Cependant, lors d'essais moteurs de givrage sur composants tournants, les informations sur le détachement de la glace restent limitées en raison des vitesses de rotation élevées et des difficultés d'instrumentation, il est ainsi difficile d'appréhender les phénomènes physiques mis en jeu. Par conséquent, la simulation numérique semble être une solution adaptée pour prédire le détachement de la glace. On distingue plusieurs modes de rupture lors du détachement de la glace: rupture adhésive à l'interface entre la glace et le substrat, rupture cohésive au sein du volume de glace ou encore selon un mode mixte (Figure 1). Par conséquent, dans ces travaux, le choix de l'approche numérique s'est porté sur la combinaison d'un modèle champ de phase pour la rupture dans le volume et d'un modèle de zone cohésive à l'interface. Ce couplage a été utilisé dans le contexte de dégivrage par système électrothermique dans [2] et dégivrage par système piézoélectrique dans [3].

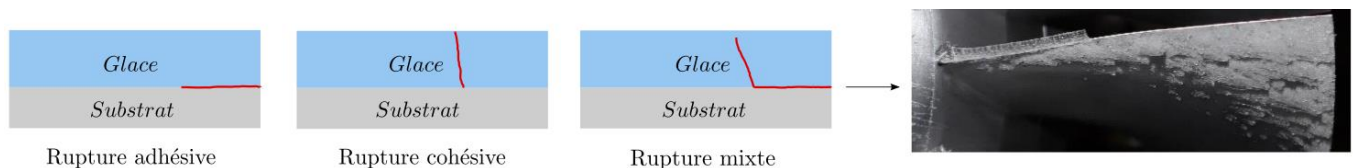


Figure 1 – Représentation des différents types de rupture de la glace sur un substrat en rotation (à gauche), rupture mixte observée lors d'essais de givrage sur aubes en rotation (à droite) pour le projet ICE-GENESIS [4]

Dans la première partie, nous soulignons l'importance du choix de propriétés mécaniques de la glace pertinentes selon le modèle de champ de phase sélectionné parmi ceux existants : AT1, AT2, Wu et d'autres listés dans [5]. Nous mettrons en évidence leur relation avec la longueur interne  $l_c$  associée au modèle champ de phase (équation 1), permettant au modèle de prédire l'amorçage et la propagation d'une fissure selon une contrainte critique  $\sigma_c$  et un taux de restitution d'énergie critique  $G_c$ . Dans la seconde partie, nous présentons les équations couplées du problème d'équilibre mécanique et de fissuration en détaillant leurs résolutions numériques par un schéma alterné. Le problème de fissuration peut engendrer des instabilités dans la réponse de la structure se traduisant par un saut de la solution du déplacement et de l'endommagement. Ce phénomène peut ainsi engendrer des difficultés numériques de convergence dans le cadre d'une résolution quasi-statique du problème non-linéaire par un algorithme standard de Newton-Raphson, ce qui nécessite de régulariser le problème. Cette régularisation est faite ici par l'utilisation d'un solveur en dynamique implicite autorisant des échelles de temps suffisamment petites pour retrouver un régime stable en introduisant des effets d'inertie. Le temps de calcul pouvant être ainsi rallongé, ce travail sera étendu par l'utilisation de la méthode de parallélisation par décomposition de domaine avec le code Z-set, utilisée avec une résolution par schéma alterné par [6]. Dans la troisième partie, nous proposons un modèle éléments finis en 3D d'une géométrie simplifiée de glace accrêtée sur un substrat en centrifuge (Figure 2) inspirée de [3]. Le modèle sera étayé de formules analytiques des champs de contrainte dans la glace et à son interface afin d'identifier la localisation de l'amorçage d'une fissure et l'emplacement potentiel d'une bifurcation de fissure entre l'interface et le volume, comme observé expérimentalement (mode mixte Figure 1). Enfin, nous montrons l'influence des paramètres matériaux sur la solution du problème de fissuration entre l'interface et le volume.

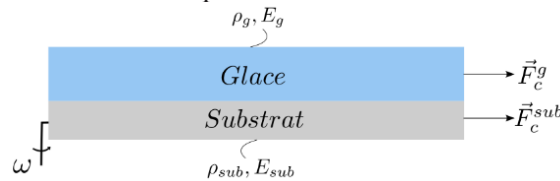


Figure 2 – Modèle mécanique à géométrie simplifiée de glace accrêtée sur un substrat sous chargement centrifuge

## 2. Comportement et propriété mécanique de la glace

La glace en tant que matériau exhibe un comportement quasi-fragile en traction, elle se déforme légèrement avant de se rompre une fois sa contrainte à rupture  $\sigma_c$  atteinte. Dans ce travail, nous considérons la glace comme un matériau isotrope caractérisé par un module d'Young  $E$ , un coefficient de Poisson  $\nu$  et une densité volumique  $\rho$ . Ces propriétés dépendent fortement des conditions de formation de la glace, qui se décline alors en plusieurs types : *rime* (glace poreuse et opaque), *glaze* (glace dense et transparente) ou glace de type *mixte*. Pour représenter le type de glace, nous utilisons le paramètre de fraction de givrante, noté  $n_0$ . Il s'agit d'un paramètre sans dimension qui indique la proportion d'eau liquide qui gèle à l'impact d'une surface. Les valeurs de  $n_0$  vont de 0 (pas de gel) à 1 (l'eau gèle instantanément à l'impact) et donnent une indication sur le type de glace accrêtée : les valeurs proches de 0,3 correspondent à de la glace de type *rime*, les valeurs proches de 1 correspondent à de la glace de type *glaze*, et les valeurs intermédiaires correspondent à de la glace de type *mixte*.

Pour modéliser la rupture de la glace, nous nous appuyerons sur la théorie de la mécanique élastique linéaire de la rupture (MELR) pour les matériaux fragiles. Cette théorie, développée par Griffith, introduit le taux de restitution d'énergie critique  $G_c$  [J/m<sup>2</sup>] qui caractérise la résistance d'un matériau à la propagation de fissures surfaciques. Ce paramètre a été identifié pour la glace dans la littérature et peut être décliné en un mode normal (mode I) et deux modes de cisaillement (mode II/III). Ce travail s'appuie sur des données matériaux confidentielles issues de projets récents menés par l'ONERA et des partenaires industriels. Nous présentons donc des résultats factices qui illustrent les valeurs obtenues et ne compromettent pas l'explication de la méthodologie. En revanche, les valeurs de longueur interne présentées, calculées à partir de l'équation (1), sont les valeurs réelles. Les résultats illustrés Figure 3.a

et Figure 3.b sont normalisés par rapport aux valeurs maximales de  $G_c$  et  $\sigma_c$ . Ils seront utilisés pour l'estimation de la longueur interne du modèle de champ de phase AT2 selon l'expression:

$$l_c = \frac{27}{256} \frac{EG_c}{\sigma_c^2} \quad (1)$$

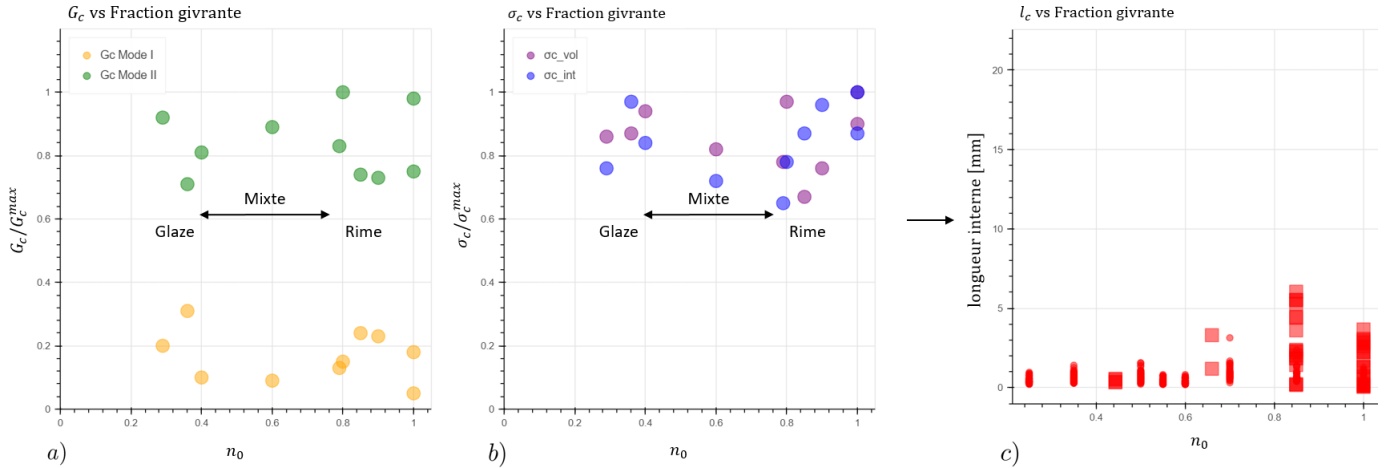


Figure 3 – Résultats factices (pour des raisons de confidentialité): a)  $G_c$  d'interface en mode I et II vs  $n_0$  b)  $\sigma_c$  à l'interface et dans le volume vs  $n_0$  c)  $l_c$  pour le modèle AT2 vs  $n_0$  (valeurs réelles)

Les valeurs observées dans la Figure 3 sont dispersées en raison des différentes conditions de formation ou de la nature des substrats. Aussi, les valeurs seront sélectionnées en fonction du cas étudié pour de la glace *rime*, *glaze* ou mixte et selon le substrat. En outre, certaines valeurs  $\sigma_c$  sont obtenues à l'interface ou à l'intérieur du volume, donc pour garantir la cohérence de la longueur interne et en raison du manque de valeurs de  $G_c$  dans le volume, seules les valeurs caractérisant l'interface seront utilisées. Les valeurs de longueur interne présentées Figure 3 sont celles obtenues pour le modèle de champ de phase AT2 qui sera présenté dans la troisième partie.

### 3. Modèle de fissuration de la glace

Lors du détachement de la glace, des fissures peuvent apparaître dans son volume, à son interface avec le substrat ou selon un régime mixte (Figure 1). Ainsi, un modèle champ de phase sera employé pour capturer des fissures dans le volume et un modèle de zones cohésives pour les fissure d'interface. La combinaison de ces modèles permettra de capturer des fissures de type mixte et ainsi leurs transitions interface/volume.

#### 3.1 Modèle champ de phase

Le modèle de fissuration dans le volume de la glace est basé sur l'approche variationnelle de la rupture [7], aussi appelé champ de phase, et en tant que modèle d'endommagement à gradient, introduit un champ continu noté  $\phi$  pour représenter la présence d'une fissure. Comme pour beaucoup de modèles d'endommagement à gradient, cette variable varie continûment de  $\phi=0$ , qui représente un matériau non endommagé, à  $\phi=1$  pour un matériau entièrement fissuré, comme le montre la Figure 4. Ce modèle introduit le gradient de cette variable  $\nabla\phi$  pour régulariser spatialement une fissure discrète (Figure 4 gauche) en une fissure diffuse (Figure 4 droite) dont l'étalement est caractérisé par une longueur  $l_c$ . Comme indiqué dans l'équation (1), cette longueur peut être liée aux propriétés du matériau dans le cas d'un modèle homogène, détaillé équation (4). La particularité de ce modèle par rapport aux modèles

d'endommagement à gradient classiques, est qu'il fait intervenir explicitement le paramètre  $G_c$  dans son équation sous forme forte (équation 3).

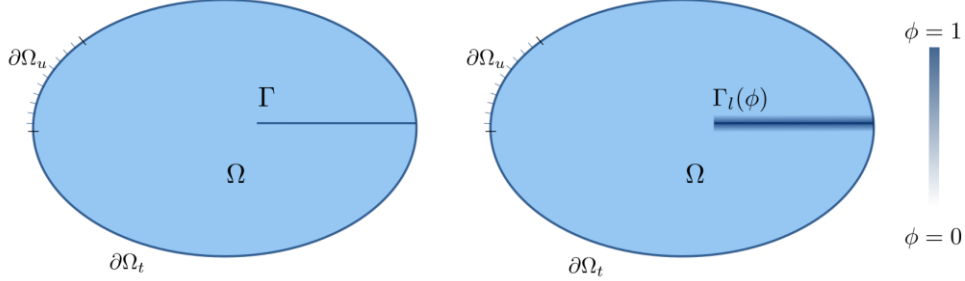


Figure 4 – Représentation d'une fissure par une surface de discontinuité  $\Gamma$  (gauche) avec un modèle à gradient (droite)

À partir de la formulation variationnelle du problème nous obtenons respectivement les équations du problème d'équilibre mécanique (équation 2) et de fissuration (amorçage et propagation) (équation 3) sous forme forte et leurs conditions aux limites. Pour le problème d'équilibre mécanique on obtient l'équation en dynamique:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \sigma + \vec{f} = \vec{u} \\ \sigma \cdot \vec{n} = \vec{t} \text{ sur } \partial\Omega_t \\ \vec{u} = \vec{u}_d \text{ sur } \partial\Omega_u \\ \sigma \cdot \vec{n} = \vec{0} \text{ sur } \Gamma \end{cases} \quad (2)$$

Et le problème de fissuration avec le modèle de champ de phase AT2 :

$$\begin{cases} \frac{G_c}{2} \left[ \frac{1}{l_c} \phi - l_c \Delta \phi \right] = (1 - \phi) \langle \Psi_0 \rangle_+ \\ \nabla \phi \cdot \vec{n} = 0 \text{ sur } \partial\Omega \end{cases} \quad (3)$$

Dans le cas d'un chargement en traction uniaxial avec un endommagement homogène (i.e.  $\nabla \phi = 0$ ), le modèle AT2 fait apparaître une contrainte critique  $\sigma_c$  à partir de laquelle on considèrera qu'une fissure s'amorce. La contrainte critique sera ainsi déterminée à partir des paramètres mécaniques de la glace introduits précédemment et du paramètre de longueur interne selon :

$$\sigma_c = \frac{9}{16} \sqrt{\frac{E G_c}{3 l_0}} \text{ pour AT2} \quad (4)$$

Les équations (1) et (2) sont fortement couplées via la relation constitutive suivante:

$$\underline{\underline{\sigma}} = (1 - \phi)^2 \underline{\underline{C}} \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle_+ + \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle_- \quad (5)$$

Et par le terme source de l'équation (3) du problème de fissuration  $\langle \Psi_0 \rangle_+$  qui est la partie positive de l'énergie élastique stockée dans le matériau lors de sa déformation et qui est basée sur une décomposition spectrale du tenseur des déformations  $\underline{\underline{\varepsilon}}$  introduite par [8] dans le cadre de modèle champ de phase. On considère alors que la force motrice pour la fissuration sera issue de sollicitations en traction uniquement, ainsi la compression ne contribue pas à la création de fissures.

$$\langle \Psi_0 \rangle_+ = \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle_+^t \underline{\underline{C}} \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle_+ \quad (6)$$

Pour résoudre ce problème numérique, nous avons adopté un schéma alterné, tel que défini dans [9], où le champ de déplacement, issu du problème mécanique, et le champ d'endommagement, issu du problème de fissuration, sont résolus alternativement jusqu'à convergence selon un critère de stagnation sur la variable d'endommagement selon l'expression (7) avec  $i$  l'indice du nombre d'itérations et  $\epsilon$  le critère d'arrêt.

$$|\phi^{i+1} - \phi^i| < \epsilon \quad (7)$$

### 3.2 Modèle de zone cohésive

Un modèle de champ de phase est utilisé pour représenter la présence de fissure dans le volume de glace et pour représenter l'amorçage et la propagation de fissures d'interface, un modèle de zone cohésive est utilisé suivant une loi de traction-séparation bilinéaire standard [10]. Ce type de modèle est non linéaire en raison de son comportement adoucissant et nécessite trois paramètres : le taux de restitution d'énergie critique  $G_c$ , la contrainte critique  $\sigma_c$  à l'interface et  $K$ , la rigidité de l'interface qui se déclinent selon plusieurs modes d'ouverture (Figure 5). Les mêmes paramètres matériaux sont utilisés pour le mode I et II, bien que le mode II sera le principal mode de rupture de la glace à l'interface du fait de la sollicitation en centrifuge.

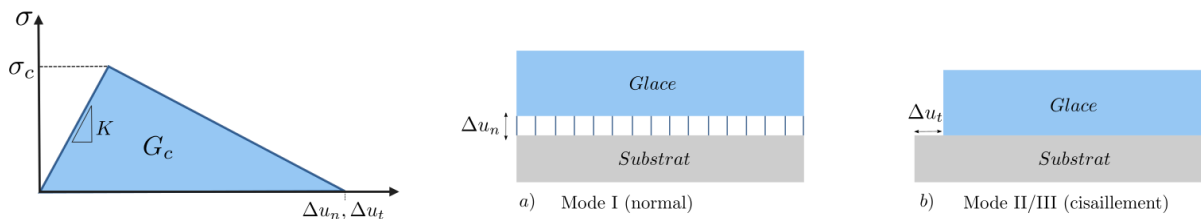


Figure 5 – Exemple d'un modèle de zones cohésives bilinéaire avec une loi traction-séparation selon différents modes : a) mode d'ouverture normal b) mode d'ouverture en cisaillement

Par la suite, nous montrerons comment le modèle de champ de phase et de zones cohésives se comportent selon le choix des paramètres matériaux et l'influence de ces derniers sur le problème de fissuration global.

## 4. Résultats

Nous avons d'abord modélisé en 3D la géométrie simplifiée avec Z-set comme représenté sur la Figure 2 avec comme substrat une barre en aluminium de 170mm de longueur et de 6,4mm d'épaisseur. Nous avons choisi de donner à glace la même longueur et épaisseur que la barre afin de simplifier l'écriture de formules analytiques des champs de contraintes de la glace. La glace est libre de contrainte à ses bords et la barre est encastree au centre de rotation, autorisant ainsi la flexion. Les propriétés de la glace sont  $E = 1500MPa$ ,  $\rho = 917kg/m^3$  et  $\nu = 0.31$ . Comme indiqué en introduction, le calcul est réalisé en dynamique implicite avec un schéma d'intégration de Newmark et est résolu avec un schéma standard de Newton-Raphson, ainsi la force centrifuge est appliquée de manière incrémentale selon une rampe linéaire sur la vitesse de rotation jusqu'à atteindre  $\omega_f = 8000tr/min$  et le critère de stagnation du schéma alterné est fixé à  $\epsilon = 1 \times 10^{-2}$ . Trois cas sont traités pour des valeurs des propriétés d'interface différentes (Tableau 1) : interface « forte » où les paramètres  $G_c$  et  $\sigma_c$  de volume et d'interface sont similaires, interface « faible » où les paramètres  $G_c$  et  $\sigma_c$  de l'interface sont respectivement divisés par 4 et 2 (afin de conserver la même taille de *process zone*) et interface « moyenne » qui est un cas intermédiaire. Dans les trois cas la longueur interne du modèle champ de phase est fixée à  $l_c = 1mm$  et la taille de maille à  $h = 1,7mm$ .

Cas	Interface forte	Interface moyenne	Interface faible
$G_c^{czm} [mJ/mm^2]$	0.001	0.00056	0.00025
$\sigma_c^{czm} [MPa]$	0.4	0.3	0.2
$G_c^{pf} [mJ/mm^2]$	0.001	0.001	0.001
$l_c [mm]$	1	1	1
$\sigma_c^{pf} [MPa] AT2(4)$	$\approx 0.4$	$\approx 0.4$	$\approx 0.4$

Tableau 1 - Paramètres matériaux pour différents cas d'interface

Dans le cas d'une interface « forte », l'amorçage et la propagation de fissures évoluent uniquement dans le volume de la glace avec le modèle champ de phase (Figure 6). À mesure que la force centrifuge augmente (chargement incrémental), une fissure s'amorce dans le volume, proche du centre de rotation, là où les contraintes radiales sont maximales et atteignent la limite  $\sigma_c^{pf} \approx 0.4MPa$  (Tableau 1) tandis que la contrainte de cisaillement n'est pas suffisante pour atteindre  $\sigma_c^{czm} = 0.4MPa$  et endommager la zone cohésive (Figure 7). Ensuite, une onde de cisaillement se propage à l'interface (courbe violette Figure 7) et des fissures se développent dans le volume selon un régime dynamique.

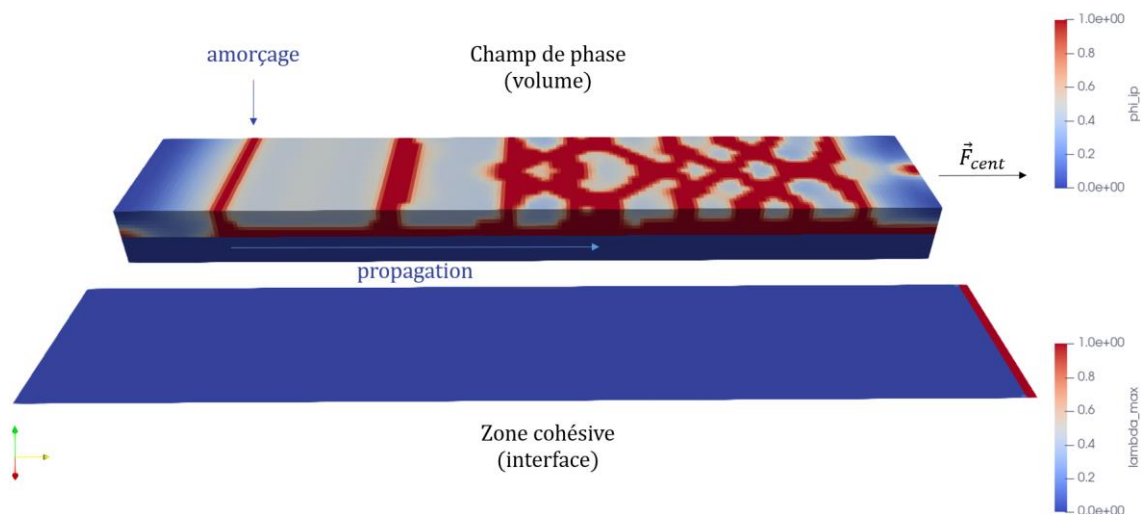


Figure 6 – Représentation des solutions d'endommagements (sans déplacement): du modèle champ de phase (en haut) et de zones cohésive (en bas) pour le cas interface « forte »

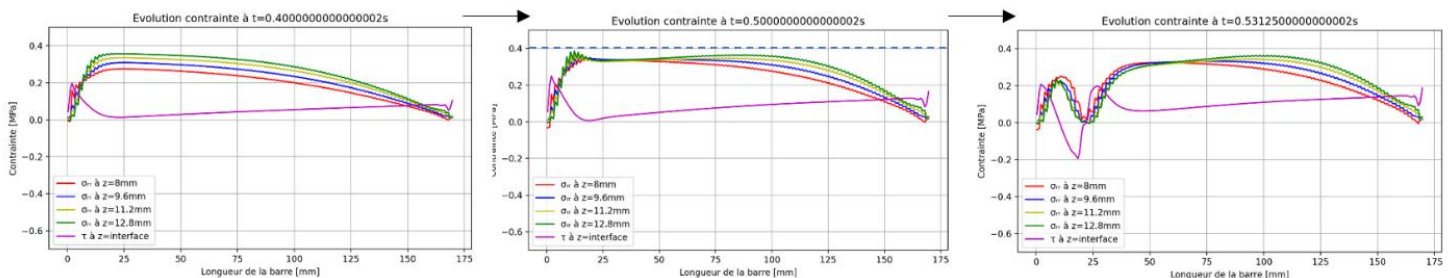


Figure 7 - Évolution à 3 instants successifs de la contrainte radiale  $\sigma_{rr}$  dans le volume de la glace (pour différentes hauteurs dans l'épaisseur) et de la contrainte de cisaillement  $\tau$  à l'interface glace/substrat avant et après amorçage de la première fissure pour le cas interface « forte »

À l'inverse, pour le cas de l'interface « faible » c'est le modèle de zones cohésives qui va entièrement s'endommager (Figure 9). La contrainte de cisaillement atteint sa limite, fixée à  $\sigma_c^{czm} = 0.2\text{MPa}$ , proche du centre de rotation où elle est maximale (courbe violette Figure 7). Cette distribution de contrainte est dû à une concentration de contrainte du fait de la géométrie. Lorsque toute l'interface est endommagée un phénomène dynamique de retour d'onde engendre l'apparition de fissure dans le volume (Figure 9). Enfin, dans le cas interface « moyenne », une fissure s'amorce dans le volume, se propage à l'interface avec le modèle champ de phase puis une transition s'opère entraînant un endommagement partiel de l'interface avec le modèle de zone cohésive.

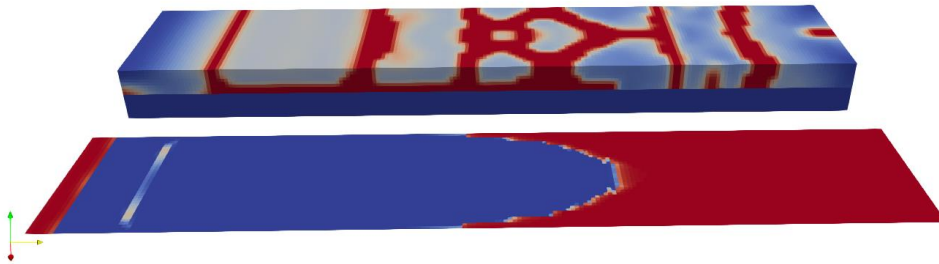


Figure 8 - Cas « interface moyenne »

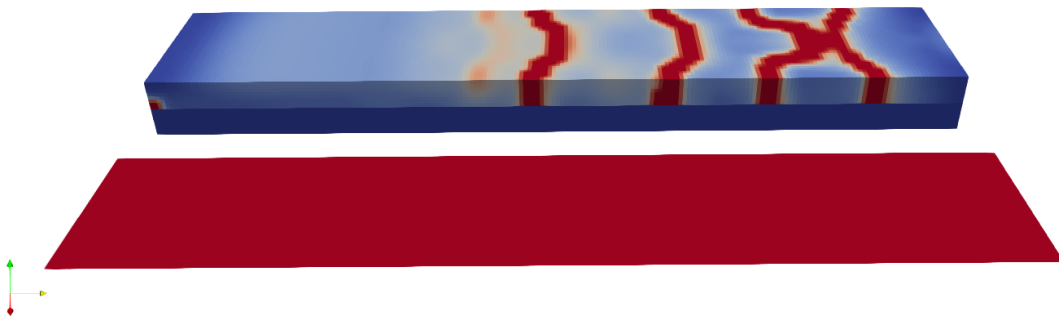


Figure 9 - Cas « interface faible »

## 5. Conclusion

L'intérêt de ce travail est d'illustrer qu'il est possible de capturer différents types de fissuration (volume, interface et mixte) à l'aide d'une combinaison d'un modèle de champ de phase et de zones cohésive. Le modèle champ de phase choisi (AT2) permet bien l'amorçage d'une fissure à partir d'un critère en contrainte  $\sigma_c$  déterminé à partir des paramètres  $E$ ,  $G_c$  et  $l_c$  pertinents au regard des propriétés de la glace, d'après la relation (4). Cependant les résultats de fissuration dépendent fortement du choix de ces paramètres des modèles champ de phase et zones cohésives. Aussi, la perspective de ce travail sera de montrer, au travers d'une étude de convergence au maillage, que les énergies dissipées lors de la fissuration correspondent bien aux taux de restitution d'énergie critique  $G_c$  fixées dans les modèles. Cette étude sera appuyée de la méthode de décomposition de domaine, permettant de résoudre les équations (2) et (3) par un schéma alterné en parallèle, afin de réduire les temps de calculs.

## 6. Références

- [1] *Z-set, material and structure analysis suite*, [www.zset-software.com](http://www.zset-software.com).
- [2] L. Bennani, P. Villedieu, et M. Salaun, « A mixed adhesion–brittle fracture model and its application to the numerical study of ice shedding mechanisms », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 158, p. 59-80, juin 2016, doi: 10.1016/j.engfracmech.2016.02.050.
- [3] A. Marbœuf, L. Bennani, M. Budinger, et V. Pommier-Budinger, « Electromechanical resonant ice protection systems: numerical investigation through a phase-field mixed adhesive/brittle fracture model », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 230, p. 106926, mai 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.106926.
- [4] « ICE GENESIS Project Overview », [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ice-genesis.eu/>
- [5] J.-Y. Wu, V. P. Nguyen, C. T. Nguyen, D. Sutula, S. Sinaie, et S. Bordas, « Phase-field modelling of fracture », p. 134.
- [6] J. Rannou et C. Bovet, « Domain decomposition methods and acceleration techniques for the phase field fracture staggered solver ».
- [7] G. A. Francfort et J.-J. Marigo, « Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 46, n° 8, p. 1319-1342, août 1998, doi: 10.1016/S0022-5096(98)00034-9.
- [8] C. Miehe, M. Hofacker, et F. Welschinger, « A phase field model for rate-independent crack propagation: Robust algorithmic implementation based on operator splits », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 199, n° 45-48, p. 2765-2778, nov. 2010, doi: 10.1016/j.cma.2010.04.011.
- [9] B. Bourdin, G. A. Francfort, et J.-J. Marigo, « Numerical experiments in revisited brittle fracture », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 48, n° 4, p. 797-826, avr. 2000, doi: 10.1016/S0022-5096(99)00028-9.
- [10] A. Turon, C. G. Dávila, P. P. Camanho, et J. Costa, « An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, n° 10, p. 1665-1682, juill. 2007, doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.08.025.