

Caractérisation, modélisation et simulation numérique du comportement de la glace en dynamique rapide

K. Soobbarayen¹, M. Bourcier², N. Lion¹, A. Combescure¹, A. Philip², P. Deconinck³, P. Hérelil³

¹ LaMCoS, INSA Lyon, {kevin.soobbarayen, nicolas.lion, alain.combescure}@insa-lyon.fr

² LGGE, Université Grenoble Alpes, {mathieu.bourcier, armelle.philip}@univ-grenoble-alpes.fr

³ Thiot ingénierie, Puybrun, France, www.thiot-ingenierie.com, {deconinck, hereil}@thiot-ingenierie.com

Résumé — Cet article propose une étude du comportement à rupture de la glace en statique et en dynamique rapide. Des essais quasi-statiques de fendage et de compression sont conduits pour estimer les contraintes à rupture. Des essais de compression en dynamique rapide sur un dispositif de Hopkinson sont effectués pour caractériser l'amplification des contraintes à rupture avec la vitesse de déformation. Le modèle de Mazars revisité est étendu à la dynamique rapide et implémenté dans un code de calcul commercial. La dépendance à la vitesse de déformation est introduite à l'aide d'un facteur d'amplification. Des simulations des essais en formulation SPH sont effectuées et la confrontation essais/calculs montre des écarts très satisfaisants en terme de contrainte et de mode de rupture.

Mots clés — glace, endommagement, dynamique rapide

1 Contexte et enjeux

Les impacts de grêlons ou de glace d'accrétion sur les structures aéronautiques et civiles génèrent d'importantes pertes de performances aérodynamiques, ainsi que des risques de dégâts sévères allant de la perforation jusqu'à l'ingestion dans le réacteur. Le matériau glace étant peu connu, il est difficile d'effectuer des simulations numériques d'impact pour estimer les risques sur ces structures. C'est pourquoi les objectifs principaux de ce projet portent sur le développement de méthodes de fabrication de glaces reproduisant les comportements des glaces réelles et sur la modélisation de leurs comportements sous choc. Ce projet implique le LaMCoS pour les aspects de caractérisation, modélisation et simulation, le LGGE de Grenoble pour la conception de glaces avec des microstructures contrôlées, et l'entreprise Thiot Ingénierie pour ses compétences en essais balistiques à très haute vitesse.

La glace est un matériau dont le comportement est proche de celui du béton : la rupture est ductile en compression, fragile en traction et ses contraintes à rupture dépendent de la vitesse de déformation [1]. Afin de caractériser les propriétés à rupture des glaces sur lesquelles nous focalisons notre intérêt, des essais quasi-statiques de compression et de fendage sont conduits en chambre froide. Puis, dans un second temps, des essais de compression dynamiques sur un dispositif de Hopkinson sont réalisés afin d'analyser l'amplification de la contrainte à rupture avec la vitesse de déformation.

Pour modéliser ce comportement, le modèle de Mazars initial est employé pour reproduire le comportement en quasi-statique. Ainsi, une loi élasto-endommageable comportant deux lois d'évolution d'endommagement (traction, compression) est utilisée [2]. Toutefois, le modèle de Mazars initial montre certaines limitations notamment une mauvaise estimation de la contrainte à rupture en chargement multi-axial [3]. C'est pourquoi nous nous sommes orientés vers le modèle de Mazars revisité qui corrige ce phénomène [3]. Pour l'extension en dynamique rapide, le concept d'amplification dynamique introduit dans [4, 5] et qui s'appuie sur le modèle de Mazars initial est repris. Dans cet article, nous présentons l'extension du modèle de Mazars revisité en dynamique rapide. Ce modèle a été implémenté par l'intermédiaire d'une loi utilisateur (u-mat) dans le code de calcul LS-Dyna et les simulations s'effectuent en formulation Smoothed Particles Hydrodynamics.

Cette étude s'organise en trois parties :

1. la présentation des essais quasi-statiques de compression uniaxiale et de fendage ainsi que les essais de Hopkinson,
2. la description du modèle de Mazars revisité, son adaptation à la dynamique rapide,
3. la confrontation essais/calculs.

2 Caractérisation expérimentale du comportement de glace

La glace existe sous une grande variété de formes ayant des microstructures très distinctes. Dans le cadre de ce projet de recherche, sept glaces ont été testées en quasi-statique dont les glaces monocristalline, polycristalline, équiaxe et une glace que nous appellerons "ordinaire". Pour les trois premières, les orientations cristallographiques sont bien maîtrisées. En ce qui concerne la glace ordinaire, la microstructure est aléatoire. Les analyses des lames minces en lumière polarisante permettent d'estimer une taille moyenne de grain de l'ordre de 5 mm. Les blocs de glace permettent de fabriquer des cylindres de 30mm×30mm. Dix essais par type de glace sont conduits afin d'estimer les propriétés moyennes ainsi que les variabilités. Dans cette étude, seuls les résultats concernant la glace ordinaire sont présentés.

2.1 Essais quasi-statiques de compression uniaxiale et de fendage

En ce qui concerne les essais quasi-statiques, le montage présenté sur la Figure 1a est utilisé. Une enceinte climatique (4) alimentée par de l'azote liquide permet de maintenir la zone d'essai à -10 degrés Celsius. Cette enceinte est montée sur une presse (1) délivrant un effort maximum de 150 kN. Un système d'acquisition par caméra permet de contrôler la validité de l'essai de rupture. D'autre part, la vitesse de déformation appliquée est de 10^{-3}s^{-1} .

Afin d'estimer la contrainte à rupture en traction, des essais de fendage sont conduits. Ce type d'essai est très simple à mettre en place et permet d'utiliser une géométrie simple pour l'échantillon. Les essais de traction directe nécessitent une géométrie d'éprouvette difficile à réaliser sur un matériau comme la glace. Comme le montre la Figure 1b, l'échantillon est sollicité le long de deux génératrices diamétralement opposées. La solution analytique de ce problème [6] permet d'écrire la contrainte de traction au centre de l'éprouvette :

$$\sigma_{\text{fail}}^{\text{tens}} = \frac{2F_{\text{max}}}{\pi\Phi H} \quad (1)$$

où F_{max} correspond à l'effort maximum appliqué, $\Phi = 30$ mm et $H = 30$ mm désignent le diamètre et la hauteur du cylindre respectivement. Sur la Figure 2a, on peut voir une séquence de rupture associée à un

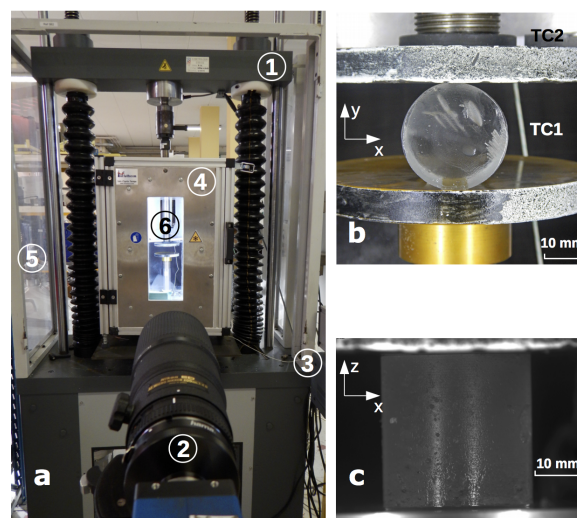


FIGURE 1 – Illustration du montage et configuration pour les essais quasi-statiques. a) montage, b) essai brésilien ou de fendage c) essai de compression uniaxiale.

essai de fendage. La contrainte au centre augmente jusqu'à l'apparition d'une fissure centrale qui rompt l'échantillon en deux : la rupture est fragile.

Les essais de compression correspondent à la configuration illustrée sur la Figure 1b. Dans le cas de faibles variations de section, la contrainte de compression dans l'échantillon est estimée par :

$$\sigma_{\text{fail}}^{\text{comp}} = \frac{4F_{\text{max}}}{\pi\Phi^2} \quad (2)$$

Pour ce cas de chargement, on peut voir l'apparition d'un réseau homogène de micro-fissures qui se développe dans l'échantillon jusqu'au pic d'effort : le comportement est ductile (Figure 2b).

Pour la glace ordinaire, l'équation 1 donne une contrainte à rupture en traction de $0.67 \pm 12\%$ MPa et l'équation 2 donne une contrainte à rupture en compression de $8.81 \pm 38\%$ MPa. Ces valeurs sont en accord avec les contraintes observées dans la littérature qui sont de l'ordre de 10 MPa en compression et de 1 MPa en traction [1]. Toutefois, les essais réalisés dans notre étude ne permettent pas d'identifier le module d'Young et le coefficient de Poisson. Dans la suite de l'étude, le module d'Young E est fixé à 10 GPa et le coefficient de Poisson ν à 0.3 qui sont des valeurs standards pour la glace comme expliqué dans [1].

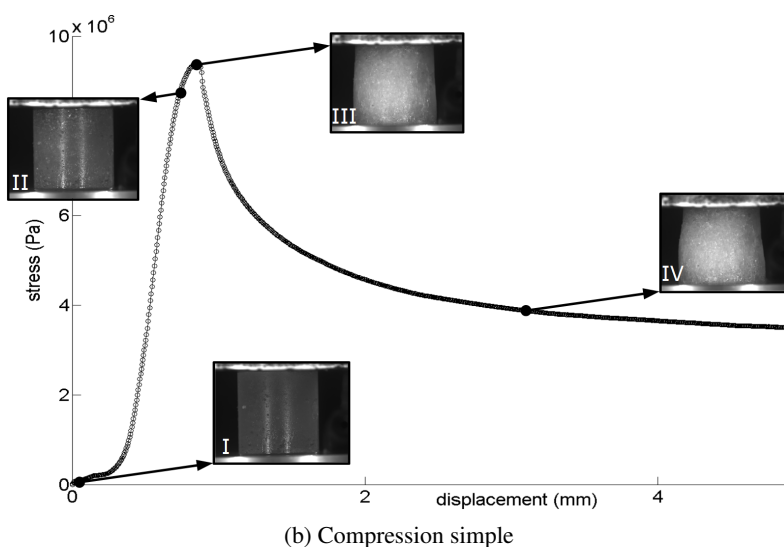
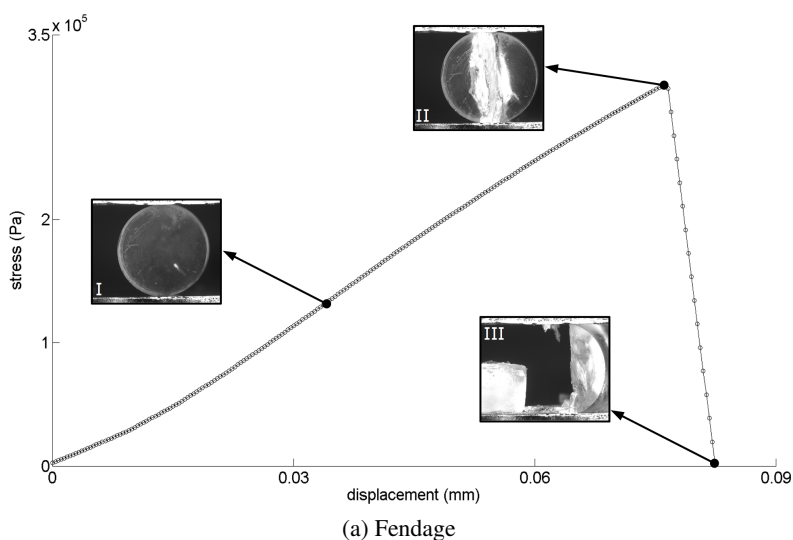
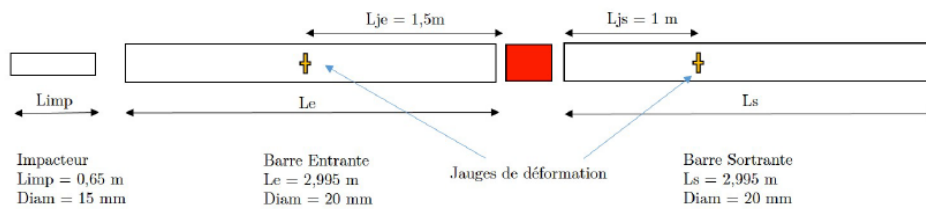
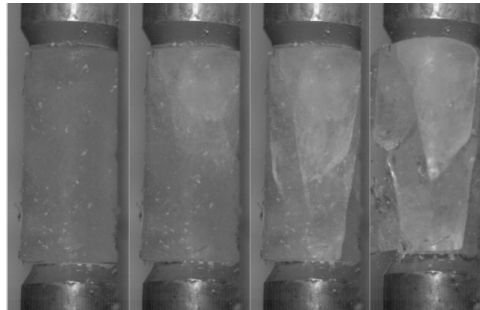


FIGURE 2 – Evolution de la contrainte en fonction du déplacement machine. a) séquence de rupture fragile en fendage et b) séquence de rupture ductile en compression.



(a)



(b)

FIGURE 3 – Essai dynamique sur les barres de Hopkinson. a) schéma de principe et b) séquence de rupture en compression.

2.2 Essais de compression dynamique

Tout comme le béton, les propriétés à rupture de la glace dépendent de la vitesse de déformation : les contraintes à rupture augmentent avec la vitesse de déformation. En effet, les études décrites dans [4] montrent un net changement du mode de rupture à très haute vitesse de déformation. Les sollicitations sont trop rapides pour que les mécanismes associés à la déformation viscoplastique (fluage, recristallisation) puissent accommoder la déformation. De ce fait, la rupture en compression est ductile à basse vitesse et devient fragile à partir d'une vitesse seuil.

Cette amplification dynamique peut être caractérisée par des essais de compression dynamique sur un dispositif de Hopkinson. Le schéma de principe de l'essai est proposé sur la Figure 3a. Un impacteur est envoyé à une certaine vitesse sur l'extrémité gauche de la barre entrante. Une onde de compression longitudinale se propage alors jusqu'à l'interface barre entrante/échantillon. Une partie de l'onde est réfléchiée dans la barre entrante et une autre partie est transmise à l'échantillon. Le calcul de l'évolution de la contrainte dans l'échantillon est réalisé en s'appuyant sur la théorie de la propagation des ondes et l'analyse des signaux des jauges de déformation des barres entrante et sortante. Le dispositif développé au LaMCoS permet d'atteindre des vitesses de déformation allant jusqu'à 1000 s^{-1} . Sur la Figure 3b, on peut voir une séquence de rupture d'un essai de compression à 300 s^{-1} , le mode de rupture est fragile à cette vitesse contrairement aux observations en quasi-statique.

3 Modèle de Mazars

3.1 Description du modèle de Mazars revisité

Comme mentionné précédemment, la glace présente des similitudes avec le béton en terme de comportement à rupture. C'est pourquoi nous avons construit notre modèle à partir du modèle de Mazars classiquement utilisé pour les bétons. Le modèle initial de Mazars est une loi de comportement élasto-endommageable qui couple une loi de Hooke élastique avec l'introduction d'une variable d'endommagement scalaire et isotrope. Deux lois d'évolution de l'endommagement sont introduites : une pour la traction et une pour la compression. Le lecteur intéressé pourra se référer à [2] pour une description détaillée de ce modèle. Cependant, le modèle initial présente des limitations, notamment une mauvaise estimation des contraintes à rupture en chargement multi-axial [3]. C'est pourquoi le modèle de Mazars

revisité est employé dans cette étude. Dans la suite, nous décrivons brièvement ce modèle et le lecteur intéressé pourra se référer à [3] pour le détail de ces améliorations.

Tout d'abord, il est nécessaire de définir un critère d'apparition du dommage D . Pour cela une loi à seuil de déformation est introduite : D peut croître si $\tilde{\epsilon} > \epsilon_{D0}$, où $\tilde{\epsilon}$ désigne la mesure de déformation équivalente et ϵ_{D0} correspond à la valeur seuil. La mesure de déformation équivalente choisie est celle du modèle de Mazars initial :

$$\tilde{\epsilon} = \sqrt{\sum \langle \epsilon_I \rangle_+^2} \quad (3)$$

où $\langle . \rangle_+$ correspond à la partie positive et ϵ_I désigne la I - me déformation principale. L'hypothèse effectuée est de considérer que seules les déformations d'extension sont susceptibles de générer de l'endommagement. En ce qui concerne l'évolution de l'endommagement, la loi suivante est utilisée :

$$D = 1 - \frac{\epsilon_{D0}(1 - A(r))}{\tilde{\epsilon}} - \frac{A(r)}{e^{B(r)(\tilde{\epsilon} - \epsilon_{D0})}} \quad (4)$$

où les coefficients A et B sont définis par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} A(r) &= A_T(2r^2(1 - 2k) - r(1 - 4k)) + A_C(2r^2 - 3r + 1) \\ B(r) &= B_T r^2 + B_C(1 - r^2) \end{aligned} \quad (5)$$

où les coefficients A_T , B_T , A_C , B_C correspondent aux paramètres d'endommagement associés à la traction et à la compression et k permet d'introduire une asymptote à la courbe contrainte/déformation en cisaillement. Ces paramètres permettent notamment de fixer la contrainte à rupture mais également de choisir le mode fragile ou ductile de rupture. Le paramètre r désigne le facteur de triaxialité défini par :

$$r = \frac{\sum \langle \tilde{\sigma}_I \rangle_+}{\sum |\tilde{\sigma}_I|} \quad (6)$$

où $\tilde{\sigma}_I$ correspond à la I -ème contrainte effective principale. r nous renseigne sur la nature du chargement et prend la valeur 1 en traction, 0 en compression et des valeurs intermédiaires en traction-compression. De ce fait, il est possible de reproduire le comportement fragile en traction et ductile en compression moyennant l'identification des paramètres A_T , B_T , A_C et B_C . Enfin, la contrainte effective principale est estimée à partir de la contrainte actuelle σ_I et des caractéristiques mécaniques d'origine du matériau sain :

$$\tilde{\sigma}_I = (1 - D)\sigma_I \quad (7)$$

3.2 Extension à la dynamique rapide

Le modèle précédemment décrit permet de reproduire le comportement de la glace en quasi-statique pour les faibles vitesses de déformation. Cependant, afin de modéliser l'amplification dynamique, il est nécessaire d'y introduire une dépendance à la vitesse de déformation. Pour cela, les concepts décrits dans [4, 5] sont repris et appliqués au modèle de Mazars revisité. Les deux modifications principales concernent l'augmentation de la contrainte à rupture et l'augmentation du seuil de déformation avec la vitesse de déformation. Pour cela, le coefficient C_{dyn} est introduit :

$$C_{dyn} = \left(\frac{\dot{\tilde{\epsilon}}}{\dot{\tilde{\epsilon}}_0} \right)^\gamma \quad (8)$$

où $\dot{\tilde{\epsilon}}$ est la vitesse de déformation équivalente, $\dot{\tilde{\epsilon}}_0$ est la vitesse à partir de laquelle les effets dynamiques sont activés et γ permet d'ajuster la dépendance à la vitesse. Ce coefficient permet d'amplifier la contrainte à rupture statique pour obtenir la contrainte dynamique :

$$\sigma_{rupt}^{dyn} = C_{dyn}\sigma_{rupt}^{stat} \quad (9)$$

Pour la compression, cette égalité impose de modifier le coefficient B_C de la loi d'endommagement. Il est possible de démontrer la relation suivante :

$$B_C^{dyn} = \frac{B_C}{C_{dyn}} \quad (10)$$

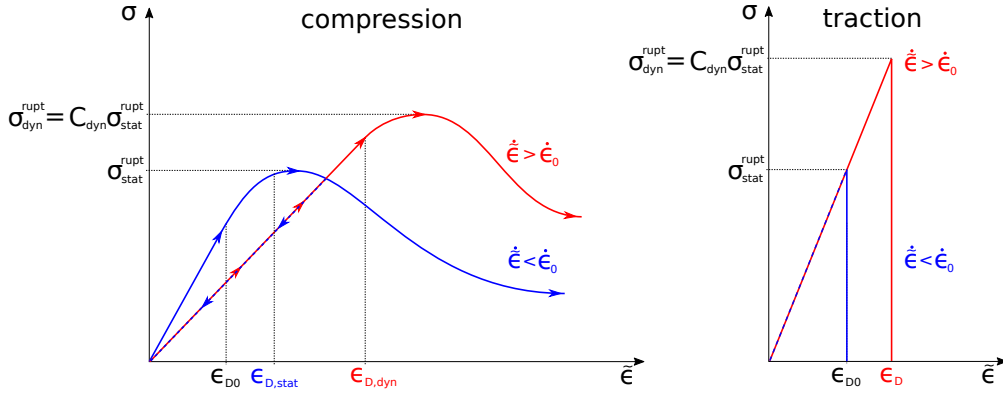


FIGURE 4 – Illustration des effets dynamiques sur le comportement en compression et en traction.

Le seuil de déformation équivalente doit également être ajusté pour tenir compte de cette amplification :

$$\epsilon_{D0}^{\text{dyn}} = C_{\text{dyn}} \epsilon_{D0} \quad (11)$$

Pour ce qui est du comportement en traction, le recul du seuil de déformation suffit pour augmenter la contrainte à rupture puisque la rupture est fragile. En effet, la rupture se produit dès que le seuil de déformation est dépassé. Une vue globale de ces modifications est proposée sur la Figure 4. En ce qui concerne la compression, on observe dans un premier temps une phase linéaire. Puis, l'endommagement s'active lorsque la déformation équivalente dépasse le seuil initial. On peut voir l'évolution du seuil courant sans effet dynamique (courbe bleue) et avec effet dynamique (courbe rouge) ainsi que l'amplification de la contrainte à rupture.

3.3 Identification des paramètres pour la glace ordinaire

Pour résumer, ce modèle de comportement nécessite l'identification des paramètres suivants :

1. Module d'Young E , coefficient de Poisson ν
2. Paramètres d'endommagement A_T, B_T, A_C, B_C, k
3. Seuil de déformation ϵ_{D0}
4. Seuil de vitesse de déformation $\dot{\epsilon}_0$
5. Amplification dynamique γ

Dans notre étude, le module d'Young est fixé à 10 GPa et le coefficient de Poisson à 0.3 (valeurs issues de la littérature). D'autre part, les coefficients A_T, A_C et k sont fixés à 1 pour imposer une contrainte nulle après rupture. Enfin, à partir du modèle présenté ci-dessus et des valeurs expérimentales de contraintes à rupture en quasi-statique, les coefficients ϵ_{D0}, B_C et B_T sont identifiés à l'aide d'une approche analytique. La campagne d'essai de Hopkinson permet de mesurer la contrainte à rupture en compression en fonction de la vitesse de déformation ce qui permet d'identifier le coefficient γ et également la vitesse seuil $\dot{\epsilon}_0$. Les paramètres de la glace ordinaire utilisés pour les simulations numériques sont listés dans le tableau 1.

$\sigma_{\text{fail}}^{\text{comp}}$	$\sigma_{\text{fail}}^{\text{tens}}$	E	ν	A_C	B_C	A_T	B_T	k	ϵ_{D0}	$\dot{\epsilon}$	γ
8.81 MPa	0.67 MPa	10 GPa	0.3	1	266	1	2520	1	6.10^{-5}	10 s^{-1}	0.16

TABLE 1 – Paramètres de la glace ordinaire

4 Confrontation essais/calculs

Le modèle de comportement de Mazars revisité avec effets dynamiques a été implémenté dans le code de calcul explicite LS-Dyna. Les simulations sont conduites en formulation Smoothed Particles Hydrodynamics qui est une méthode sans maillage. Son avantage par rapport à la méthode des éléments finis est que la chute du pas de temps liée à de fortes distortions des éléments est évitée. Ainsi, il est possible de conduire les simulations au delà de la rupture. Le lecteur intéressé pourra se référer à [7] pour une revue détaillée de la méthode SPH. Le modèle numérique est un cylindre de 30×30 mm contenant environ cent mille billes.

4.1 Simulation en quasi-statique

Sur la Figure 5a, on peut voir l'évolution de l'endommagement dans le plan de rupture. L'endommagement apparaît au centre de l'éprouvette et croît jusqu'à l'apparition d'une macro-fissure centrale. En terme de mode de rupture, le modèle reproduit fidèlement les observations expérimentales. L'écart entre les contraintes à rupture expérimentales et numériques est de 5%.

En ce qui concerne la compression, on peut voir sur la Figure 5b l'apparition d'un endommagement uniforme jusqu'à l'apparition de macro-fissures. On voit nettement le comportement ductile et on peut conclure que le modèle permet de reproduire le comportement en compression. L'écart entre les contraintes expérimentale et numérique est de 3%

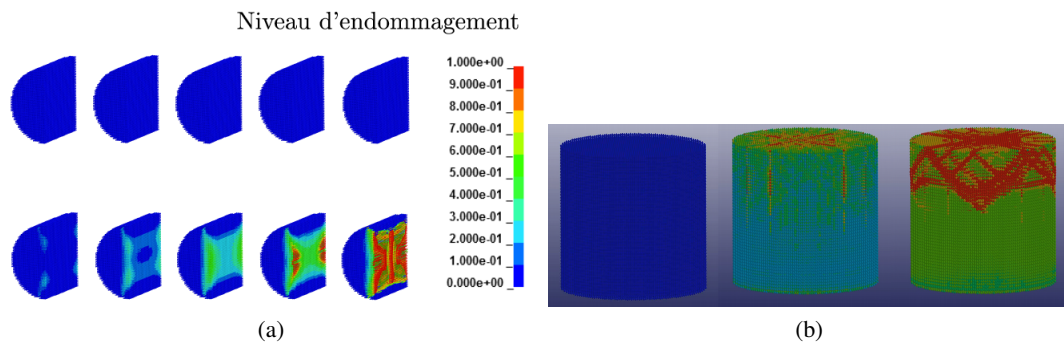


FIGURE 5 – Simulation d'un essai de fendage et de compression statique.

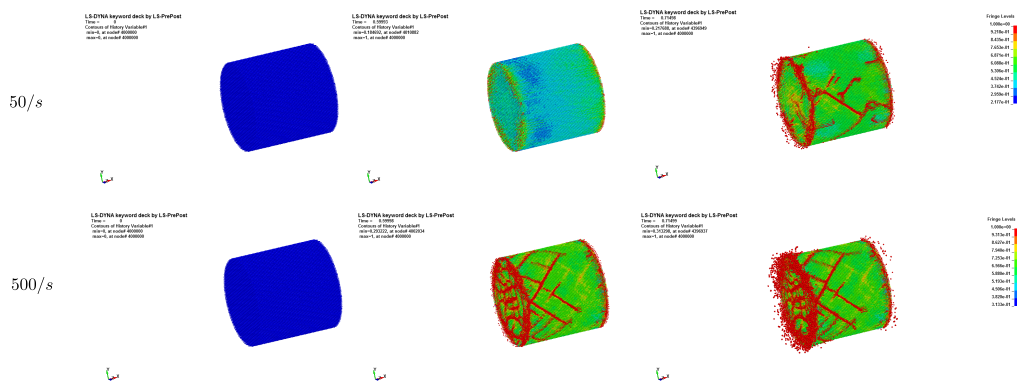


FIGURE 6 – Simulation des essais de compression dynamique pour deux vitesses de déformations.

4.2 Compression dynamique : essai de Hopkinson

Un modèle numérique de barres de Hopkinson a été construit. Les barres sont maillées en éléments finis et l'échantillon de glace en SPH. Deux vitesses de déformations sont présentées 50 et 500 s⁻¹. Sur la Figure 6 on peut voir les deux fasciés de rupture associés aux deux vitesses d'étude. Pour ces deux cas, on peut voir que le modèle permet de changer le mode de rupture qui devient fragile pour cette gamme de vitesse. D'autre part en terme de contrainte à rupture, on observe des écarts inférieurs à 10% entre les mesures expérimentales et les simulations.

5 Conclusions

Dans un premier temps, cette étude présente des résultats d'essais quasi-statique et en dynamique rapide sur la glace. Le comportement à rupture de la glace est mis en évidence : fragile en traction, ductile en compression statique et fragile en compression à haute vitesse.

Le modèle de Mazars revisité est présenté. Ce dernier permet de reproduire avec précision les modes et contraintes à rupture en quasi-statique. D'autre part, ce modèle est étendu en dynamique rapide en introduisant un coefficient d'amplification qui augmente les contraintes à rupture avec la vitesse de déformation.

Ce modèle de Mazars revisité et étendu à la dynamique rapide est implémenté dans le code de calcul explicite LS-Dyna et des simulations numériques des essais sont conduites en formulation SPH. La confrontation essais/calculs montre des écarts de contraintes à rupture satisfaisants avec 5% et 3% pour les essais statiques et 10% pour les essais dynamiques. L'analyse des modes de rupture montre que la transition ductile/fragile en compression avec la vitesse de déformation est bien décrite par le modèle.

6 Remerciements

Les auteurs remercient la Direction Générale de l'Armement (DGA) pour son support financier dans le cadre du projet RAPID 142906128.

Références

- [1] E. M. Schulson. *Brittle failure of ice*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 68, no 17, 1839–1887, 2001.
- [2] J. Mazars. *A description of micro-and macroscale damage of concrete structures*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 25, no 5-6, 729–737, 1986.
- [3] J. Mazars, F. Hamon, S. Grange. *A model to forecast the response of concrete under severe loadings the μ damage model*, Procedia Materials Science, vol. 3, p. 979–084, 2014.
- [4] Y. Chuzel. *Caractérisation expérimentale et simulation numérique d'impacts de glace à haute vitesse*, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2009.
- [5] R. Ortiz, E. Deletombe, Y. Chuzel-Marmot. *Assessment of damage model and strain rate effects on the fragile stress/strain response of ice material*, International Journal of Impact Engineering, vol. 76, p. 126–138, 2015.
- [6] C. Fairhurst. *On the validity of the Brazilian test for brittle materials*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 1, p. 535–546, 1964.
- [7] R. A. Gingold, J. J. Monaghan. *Smoothed particle hydrodynamics : theory and application to non-spherical stars*. Monthly notices of the royal astronomical society, vol. 181, no 3, p. 375–389, 1977.