

Assimilation d'endommagement dans un modèle Maxwell-Élasto-Fragile

pour les petites et grandes déformations des géomatériaux

V. Dansereau^a, A. Korosov^a, P. Rampal^a

a. Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway,
veronique.dansereau@nersc.no
anton.korosov@nersc.no
pierre.rampal@nersc.no

MOTS CLES : rhéologie de Maxwell ; endommagement progressif ; relaxation des contraintes ; petites et grandes déformations ; assimilation de données.

Résumé

Un nouveau cadre de modélisation mécanique a récemment été développé dans le but de représenter les petites et les grandes déformations de matériaux naturels quasi-fragiles par une approche continue. Il est actuellement implémenté dans un modèle de circulation générale de la banquise. Le besoin de simuler avec précision la position et la structure spatiale des fractures au sein de la banquise a mené à une tentative d'assimilation de l'endommagement dans ce modèle. La nouvelle rhéologie, la méthode d'assimilation utilisée ainsi que les résultats préliminaires de cette assimilation sont discutés.

1. Introduction

Du point de vue de la mécanique des milieux continus, un nombre de géomatériaux subissent à la fois de petites déformations très localisées, qui sont associées à leur rupture, et de grandes déformations post-rupture qui dissipent les contraintes. C'est le cas par exemple pour la croûte terrestre, dans laquelle des événements de fracturation co-sismiques le long de failles peuvent activer un fluage aismique qui résulte en des déformations beaucoup plus grandes que celles dues à la fracturation elle-même [1]. Dans le cas des volcans ou des glissements de terrain, les petites déformations se cumulent et mènent à des déformations catastrophiquement grandes. La modélisation du cycle complet de tels phénomènes doit donc prendre en compte les deux types de déformation.

Un nouveau cadre rhéologique continu nommé Maxwell-Élasto-Fragile (MEB) [2] a été développé dans le but de représenter les petites et grandes déformations de matériaux quasi-fragiles via une combinaison des concepts de mémoire élastique, d'endommagement et de relaxation visqueuse des contraintes. Il a été démontré capable de reproduire avec succès la localisation de la déformation ainsi que les propriétés statistiques, dont les lois d'échelle, qui en découlent [2,3].

Dans le cas des objets géophysiques mentionnés ci-dessus, comme probablement dans le cas de certains matériaux et structures industriels, une modélisation pertinente ne vise toutefois pas seulement la représentation adéquate des *propriétés statistiques* de la déformation, mais également la prédiction du *moment de la formation, de la position et de la structure* des fractures (ou failles). Une telle prédiction nécessite une connaissance des conditions initiales de l'état (hétérogénéité, endommagement, etc.) du matériau et leur assimilation dans les modèles.

Une tentative d'assimilation de l'endommagement dans la rhéologie MEB est décrite ici dans le contexte de la simulation du comportement mécanique d'un matériau quasi-fragile à l'échelle géophysique ; la glace de mer en Arctique. Ses résultats préliminaires sont brièvement discutés.

2. La rhéologie Maxwell-Élasto-Fragile

La rhéologie MEB est inspirée d'un cadre de modélisation élasto-fragile utilisé pour les roches et la glace [4]. Elle se base sur la loi constitutive de Maxwell

$$\frac{1}{E(d)} \frac{D\sigma}{Dt} + \frac{1}{\eta(d)} \sigma = K: \dot{\epsilon} \quad (1)$$

où σ est le tenseur des contraintes et $\dot{\epsilon}$, le tenseur du taux de déformation. La loi constitutive est appliquée ici à un solide élastique, d'où le tenseur de rigidité K , qui est défini en termes du coefficient de Poisson. À l'instar du modèle de Maxwell, le module élastique, E , est celui du matériel simulé à l'échelle mésoscopique. Cependant, η n'est pas la *vraie* viscosité du matériel simulé, mais plutôt une viscosité apparente qui représente sa résistance moyenne à l'écoulement; un concept utilisé dans la modélisation des roches et des failles [5,6].

Dans le présent modèle, les deux paramètres mécaniques évoluent en temps et en espace en fonction du degré d'endommagement du matériau, lequel est représenté par une variable scalaire, d , qui évolue entre 0 pour un matériel non-endommagé et 1 pour un matériel « complètement » endommagé [7]. L'endommagement augmente localement lorsque l'état de contrainte excède un critère de Mohr-Coulomb. Le module élastique et la viscosité décroissent alors dans des proportions différentes, de sorte que leur ratio, $\lambda = \eta/E$, qui s'interprète comme le temps de dissipation des contraintes, décroît également. Le couplage entre d et les paramètres mécaniques est réalisé de façon à ce que le modèle permette d'une part la dissipation partielle des contraintes par le biais de déformations permanentes, possiblement grandes, le long de fractures lorsque le matériau est fortement endommagé et, d'autre part, la conservation de la mémoire des contraintes associées aux déformations élastiques dans les zones où le matériau reste peu endommagé. Sa forme exacte dépend du matériel simulé et peut impliquer d'autres variables locales telle la densité, comme dans un milieu granulaire [8], ou la température [6]. Afin de prendre en compte différents mécanismes de cicatrisation (regel, cémentation, frittage, etc.) d peut également diminuer, ce qui contrebalance l'effet de l'endommagement sur des périodes de temps plus longues.

Des études de sensibilité produites dans le contexte de simulations idéalisées du comportement d'un matériau quasi-fragile en compression ont démontré que ce cadre rhéologique simple peut représenter des comportements mécaniques variés [2,3]. En variant le paramètre réglant le *taux de dissipation* des contraintes en fonction du degré d'endommagement local, le modèle peut représenter soit (1) un comportement totalement prédictible de type "stick-slip", avec une unique fréquence d'endommagement correspondant au temps caractéristique du processus de cicatrisation prescrit ou (2) un comportement complètement imprédictible caractérisé par une activité

d'endommagement corrélée sur toutes les échelles temporelles en-deçà de ce temps de cicatrisation. Sur une gamme de valeurs de ce paramètre, le modèle reproduit à la fois la persistance de fractures existantes et l'activation de nouvelles fractures de formes et d'orientations différentes.

3. Assimilation d'endommagement dans un modèle continu de la banquise

3.1 Contexte

Un autre exemple d'objet géophysique subissant à la fois des petites et des grandes déformations est la fine couche de glace qui recouvre les océans polaires. Cette banquise se fracture de manière quasi-fragile sous l'effet des vents et des courants océaniques [10]. Le long des failles formées, appelées « leads », la dérive des plaques de glace peut être de plusieurs mètres, voir kilomètres, par jour [11].

La rhéologie MEB a récemment été implémenté dans un modèle dynamique et thermodynamique continu de la glace de mer appelé neXtSIM [12], développé au *Nansen Environmental and Remote Sensing Center* (Bergen, Norvège) à des fins opérationnelles et d'étude du climat. Il s'agit d'un modèle par éléments finis représentant la couverture de glace à l'échelle de l'Océan Arctique comme une plaque 2D en contraintes planes. Il utilise des forçages océaniques et atmosphériques réalistes issus de réanalyses. Une représentation Lagrangienne des équations du mouvement est utilisée et une méthode de remaillage dynamique est implémentée pour le traitement des processus d'advection.

Il a été démontré que, lorsque implémentée dans neXtSIM, la rhéologie MEB reproduit avec succès les propriétés statistiques observées de la déformation de la banquise, soit son hétérogénéité, son intermittence et sa multifractalité en temps et en espace (*Rampal et al. 2018*, en préparation). Cependant, dans le cadre d'une utilisation pour la navigation en eaux englacées ou pour l'estimation des contraintes exercées par les glaces sur les structures offshore, il est impératif qu'un modèle opérationnel pour la glace de mer représente non seulement les propriétés statistiques de la déformation mais également le timing des événements de fracturation ainsi que la position des leads dans la couverture de glace et ce, sur une échelle temporelle de quelques jours. C'est pourquoi une tentative d'assimilation du degré d'endommagement de la banquise dans neXtSIM est menée.

3.2 Méthode

L'endommagement, en tant que variable *mésoscopique* représentant la densité des failles présentes à l'échelle *sous-maille*, peut difficilement être estimé à partir des observations de la couverture de glace disponibles. L'une des raisons majeures de cette difficulté est le fait que la résolution spatiale des observations est insuffisante pour ce faire, puisque de l'ordre de la résolution du modèle continu lui-même. Ici, le degré d'endommagement est donc *estimé* d'une manière très simple à partir d'observations satellitales de la dérive des glaces.

En premier lieu, les taux de déformation sont calculés à partir de paires d'images satellite SAR (Synthetic Aperture Radar, voir Fig. 1a) grâce à une combinaison de méthodes de « feature tracking » et « pattern matching » décrite par [13]. Lorsque le taux de déformation estimé dépasse localement un seuil donné, la couverture de glace est considérée comme étant complètement endommagée ($d = 1$). Cette hypothèse se base sur l'observation que le taux de cisaillement utilisé comme seuil, ici 0.3% par jour, est virtuellement toujours associé à la présence d'un lead ouvert dans la couverture de glace, le long duquel les contraintes sont rapidement dissipées et donc la mémoire des déformations élastiques perdue. Ailleurs, l'endommagement est considéré nul ($d = 0$).

La Figure 1b représente l'assimilation d'un champ d'endommagement calculé avec cette méthode. Dans ce cas particulier, un spin-up du modèle neXtSIM est effectué sur 10 jours (du 1 au 10 Février

2018), à l'échelle de l'Océan Arctique, après quoi l'endommagement estimé à partir du champ de déformation observé le 11 Février (Fig. 1a) est assimilé (Fig. 1b, encadré blanc) par une méthode d'insertion directe. Le modèle est ensuite incrémenté sur 3 jours.

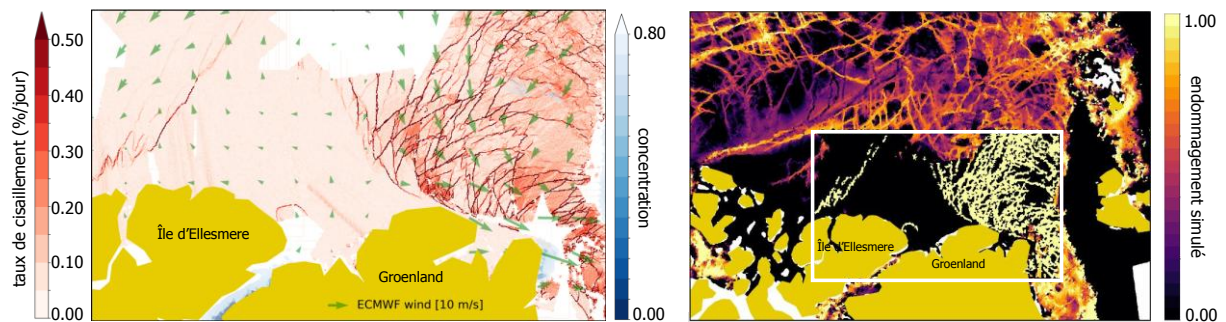


Figure 1. Taux de cisaillement (%/jour) et concentration de glace estimés par corrélation d'images SAR au 11 Février 2018 (résolution : 2 km). (b) Champ d'endommagement simulé par neXtSIM à une (résolution 7.5 km) et champ d'endommagement assimilé (encadré blanc) au 11 Février 2018.

4. Résultats et discussion

Cette assimilation améliore en partie la position des leads dans la couverture de glace sur une période d'environ 1 jour (Fig. 2a). On note en particulier l'amélioration de la position du front (à droite de l'image), qui correspond au passage d'une tempête au nord du Groenland ainsi que d'un lead isolé au nord de l'île d'Ellesmere par rapport à la même simulation sans assimilation (Fig. 2b). Cependant, là où la banquise est densément fracturée, aucune amélioration n'est observée.

Ce manque de performance peut être attribué à plusieurs facteurs, dont l'inexactitude du forçage atmosphérique utilisé. Un facteur probablement prédominant cependant est l'inexactitude du modèle dans sa représentation de la distribution spatiale d'autres variables impactant son comportement dynamique. La glace de mer est en effet un milieu hautement hétérogène du point de vue de son épaisseur et de sa concentration (fraction de l'aire couverte de glace versus d'eau). Cette hétérogénéité est d'autant plus importante dans les zones où la glace est densément fracturée. Une assimilation de la valeur de ces variables est donc peut-être indispensable afin de représenter la structure des réseaux de fractures denses, même aux échelles de temps fines. La présente méthode d'estimation de l'endommagement constitue potentiellement un deuxième facteur important. Une méthode réaliste devrait effectivement assigner à d une valeur graduelle entre 0 et 1. La relation entre le taux de déformation et la contrainte étant non-linéaire dans la rhéologie MEB (Eq. (1)), la dépendance du taux de déformation à l'endommagement ne peut être établie de manière analytique. Cependant, elle pourrait être inférée sur la base de simulations numériques.

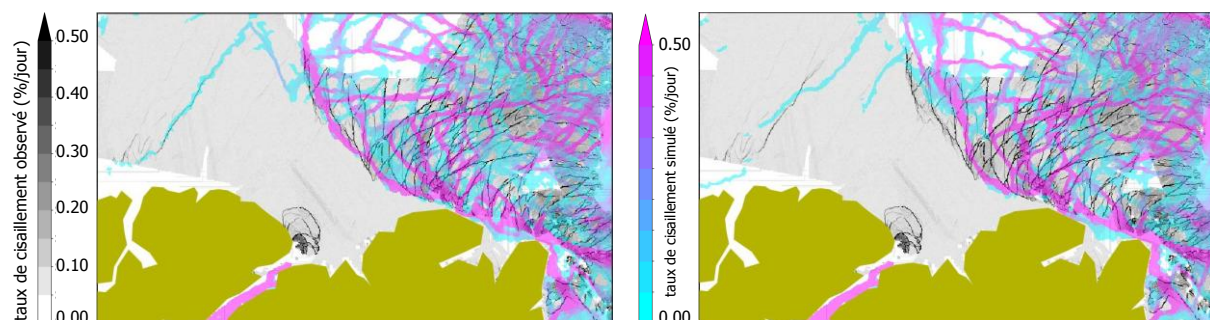


Figure 2. Taux de cisaillement (%/jour) estimé par corrélation d'images SAR (gris) et simulé par neXtSIM (couleur) après 24 heures (a) avec et (b) sans assimilation de l'endommagement.

Conclusions

Une tentative d'assimilation d'endommagement dans un modèle continu de la banquise basé sur une rhéologie Maxwell-Élasto-Fragile par une méthode simplifiée a démontré une amélioration *partielle* de la capacité du modèle à simuler la position et l'orientation des fractures observées. Bien que partielle, cette amélioration est non-négligeable compte-tenu du caractère extrêmement hétérogène et intermittent de la déformation de la banquise. Il est supposé qu'une assimilation régulière de champs d'endommagement pourrait également accroître la capacité de prédiction à long terme des modèles grâce à la représentation de la ré-activation de vieilles fractures partiellement cicatrisées.

Remerciements

V. Dansereau est supportée par le *Research Council of Norway*. A. Korosov et P. Rampal sont supportés par le *Research Council of Norway* et par un projet financé par le Service Hydrographique et Océanique de la Marine française.

REFERENCES

- [1] Z. Cakir, S. Ergintav, H. Ozener, U. Dogan, A.M. Akoglu, M. Meghraoui, R. Reilinger. Onset of aseismic creep on major strike-slip faults. *Geology*, 40(12) (2012) 1115–1118
- [2] V. Dansereau, J. Weiss, P. Saramito, P. Lattes. A Maxwell elasto-brittle rheology for sea ice modelling, *The Cryosphere*, 10 (2016) 1339–1359
- [3] J. Weiss, V. Dansereau. Linking scales in sea ice mechanics, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 375 (2017) 10.1098/rsta.2015.0352
- [4] D. Amitrano, J.-R. Grasso, D. Hantz. From diffuse to localised damage through elastic interaction. *Geophysical Research Letters*, 26 (1999) 2109–2112
- [5] V. Lyakhovskiy, Y. Ben-Zion, A. Agnon. Distributed damage, faulting and friction. *Journal of Geophysical Research*, 102(B12) (1997) 27,635–27,649
- [6] S. Frederiksen, J. Braun. Numerical modelling of strain localisation during extension of the continental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 188 (2001) 241–251
- [7] L. M. Kachanov. Time of the rupture process under creep conditions. *Izvestiia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk*, 8 (1958) 26–31
- [8] I. S. Aranson, L. S. Tsimring. Patterns and collective behavior in granular media: Theoretical concepts. *Reviews of Modern Physics*, 78 (2006) 641–692
- [9] V. Dansereau, J. Weiss, P. Saramito, P. Lattes, E. Coche. Ice bridges and ridges in the Maxwell-EB sea ice rheology, *The Cryosphere*, 11 (2017) 2033–2058
- [10] J. Weiss. *Drift, Deformation, and Fracture of Sea Ice, A perspective across scales*. SpringerBriefs in Earth Sciences, Springer Netherlands, 2013
- [11] R. Kwok. Deformation of the Arctic Ocean sea ice cover: November 1996 through April 1997 in: J. Dempsey and H. H. Shen (ed.) *IUTAM Symposium on Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics, Solid Mechanics and Its Applications*, Springer Netherlands, 2001, pp. 315–323
- [12] P. Rampal, S. Bouillon, E. Ólason, M. Morlighem. neXtSIM: a new Lagrangian sea ice model, *The Cryosphere*, 10, (2016) 1055–1073

- [13] A. Korosov, P. Rampal. A combination of feature tracking and pattern matching with optimal parametrization for sea ice drift retrieval from SAR data. *Remote Sensing*, 9 (2017) doi:10.3390/rs9030258