

Titre du projet :

Modélisation de la dynamique des instabilités des édifices volcaniques

Volet :

Porteur du projet : Jean-Luc GOT

Laboratoires impliqués : ISTerre, IRSTEA

Bilan du projet pour l'année/la période

Bilan d'activité (1 page max)

L'objectif de ce projet est de comprendre mieux le risque volcanique, en prenant en compte les lois constitutives des matériaux et l'interaction fluide-structure. Il s'agit d'un projet à long terme qui comporte plusieurs étapes de modélisation. L'objectif final est de modéliser l'évolution spatio-temporelle d'un édifice volcanique pressurisé, soit par un réservoir magmatique, soit par la pression de pore (dans le cas d'un milieu poreux), lorsque cet édifice s'endommage progressivement sous la pression d'un fluide visqueux lentement transféré depuis la profondeur.

En préalable à une modélisation complète 3D, nous avons d'abord réalisé, comme indiqué dans notre projet, une modélisation axisymétrique et recherché une solution au système différentiel qui représente l'évolution temporelle du système. Nous avons d'abord recherché une loi d'endommagement basée sur la sismicité, puis un modèle de sismicité en fonction du temps (qui ajuste parfaitement les données, Figure 1), pour trouver une loi d'endommagement en fonction du temps, intégrable. Nous avons alors trouvé une solution analytique (Figure 1) dans le cas d'un édifice pressurisé par un réservoir magmatique, pour la surpression du réservoir, le déplacement, le flux de magma et la puissance de la déformation, en fonction du temps. Cette solution permet d'ajuster parfaitement à la fois les données de sismicité et de déformation enregistrées entre 2004 et 2011 au Grimsvötn (Islande). Ces solutions sont extrêmement puissantes et utiles pour comprendre la dynamique de ce système non-linéaire. Ce sont aussi des références (benchmarks) qui seront utiles pour tester les modélisations 2D-3D ultérieures. Nous caractérisons le système par trois paramètres seulement : le déplacement élastique linéaire limite, la constante de temps du système d'approvisionnement, et l'exposant de la loi d'endommagement ; sur le Grimsvötn, nous avons estimé les valeurs de ces paramètres en ajustant le déplacement de surface (Figure 1). Ces valeurs permettent d'inférer l'histoire de la constante de temps d'approvisionnement, de la surpression dans le réservoir magmatique, du flux de magma dans le conduit et de la puissance de la déformation. Les extrema de ces fonctions permettent de définir 5 périodes particulières dans la dynamique pré-éruptive de ce type (basaltique) de volcan. Cette analyse est extrêmement utile pour comprendre le risque volcanique, caractériser l'état du système, et savoir quand il entre en période de fluage tertiaire, qui conduit à la rupture et l'éruption.

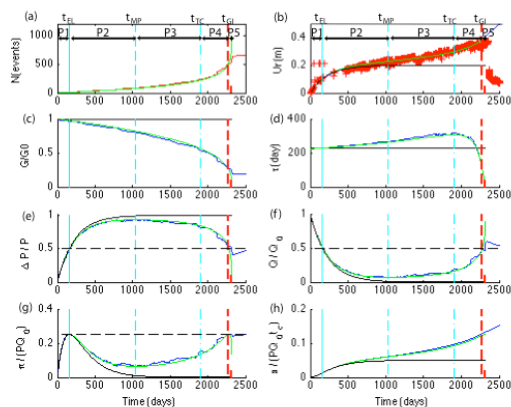
Nous avons ensuite exploré la modélisation spatiale de l'interaction magma-édifice, dans le cas d'un simple réservoir pressurisé, dans un édifice endommageable :

- d'une part en utilisant l'approche d'endommagement de David Amitrano, en éléments finis, où le module d'Young diminue lorsque la contrainte dans un élément atteint le seuil de rupture; on retrouve bien le pattern de déformation (dû à l'effet de surface libre) mis en évidence par les modélisations analogiques et les observations de terrain (Figure 2). Cette approche de modélisation simule l'hétérogénéité de l'endommagement dans le matériau (article en cours). La pression est constante dans le réservoir ; la dynamique n'est pas modélisée, le temps n'étant pas pris en compte (mais cela permet de suivre la rupture jusqu'à son terme).
- d'autre part en utilisant l'environnement de développement MOOSE-REDBACK (éléments finis multi-physiques, stage de Manon SEVAUX); nous avons réussi à modéliser les premiers stades de l'endommagement mais pas les stades finaux, notamment parce que l'endommagement dans le matériau était très localisé, le matériau homogène, et qu'aucun mécanisme de dissipation physique ne permettait de ralentir la rupture (la rupture intervenait très brutalement sans que le pattern d'endommagement mis en évidence avec la première approche puisse être retrouvé). Nous n'avons pas pu utiliser THETA-STOCK (C. Arson et M. Gatmiri) qui ne pouvait représenter une dynamique très rapide.
- Nous reprenons aujourd'hui avec succès cette idée en utilisant RHEOLEF (P. Samarito, LJK, IMAG) en collaboration avec V. Dansereau, post-doctorante avec J. Weiss (ISTerre). Dans cette approche la viscosité du matériau est prise en compte et permet une déformation avec dissipation visqueuse qui permet de ralentir la rupture. Nous retrouvons le pattern spatial mis en évidence Figure 2, avec cette fois-ci la dynamique temporelle et la propagation du fluide dans les zones endommagées et perméables, et la modélisation de grandes déformations. Cette modélisation ouvre la voie à la réalisation finale du résultat recherché (modélisation de la dynamique spatio-temporelle, bifurcation entre plusieurs solutions possibles), via la mise au point d'une loi réaliste entre endommagement et perméabilité à cette échelle et sa description par un minimum de paramètres.

Le projet a donc permis :

1. d'avancer de façon significative dans la direction proposée, même si le choix actuel de l'approche et des collaborations (RHEOLEF, P. Samarito, V. Dansereau, J. Weiss) ne correspond pas à ce qui avait été envisagé (THETASTOCK, C. Arson).
2. de produire un article fondateur dans le J. Geophys. Res. grâce aux solutions analytiques trouvées (ce qui constituait la première partie du projet) ; d'autres suivent...

Illustrations - avec légende et crédit (à envoyer également séparément)



$$N(t) = -\frac{1}{c} \ln(1 - cBt) \tag{1}$$

$$\frac{G(t)}{G_0} = \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^a \tag{2}$$

$$\frac{1}{\tau(t)} = \frac{1}{\tau_0} \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^a + \frac{a}{t_c - t} \tag{3}$$

$$\frac{u(t)}{u_{el}} = \alpha^{1-s} \left(\gamma(s, \alpha) - \gamma\left(s, \alpha \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{a+1}\right) \right) e^{\alpha(1-\frac{t}{t_c})^{a+1}} \tag{4}$$

$$\frac{\Delta P(t)}{P} = \alpha^{1-s} \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^a \left(\gamma(s, \alpha) - \gamma\left(s, \alpha \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{a+1}\right) \right) e^{\alpha(1-\frac{t}{t_c})^{a+1}} \tag{5}$$

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - \frac{\Delta P(t)}{P} \tag{6}$$

$$\frac{\Pi(t)}{\Pi_0} = \frac{\Delta P(t)}{P} \left(1 - \frac{\Delta P(t)}{P}\right) \tag{7}$$

Figure 1 : Modélisation des données du Grimsvötn (01/12/2004 – 31/12/2011) : variables du modèle en fonction du temps. Les données sont en rouge, la solution Runge-Kutta (RK) en bleu, la solution analytique en vert, la solution linéaire élastique en tireté noir. t_c est estimé à partir de $N(t)$, t_0 , u_{el} et a à partir de $u(t)$. γ : fonction γ incomplète. D'après Got et al., 2017.

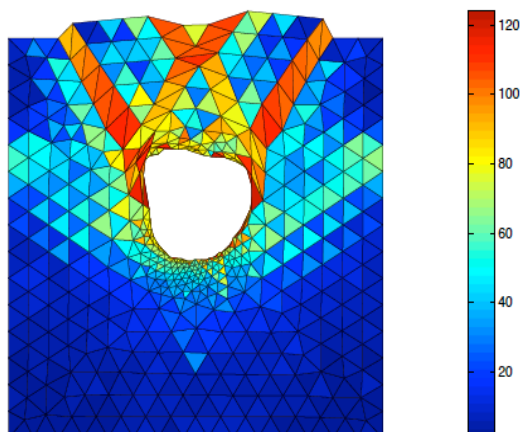


Figure 2: Nombre de ruptures par cellule, dans un modèle éléments finis 2D montrant la déformation d'un édifice volcanique pressurisé par un réservoir magmatique initialement circulaire (pression constante; déplacement horizontal nul sur les limites verticales). Le modèle suit l'algorithme d'Amitrano et al. (1999): la rupture a lieu dans une cellule lorsque le critère de Mohr-Coulomb est satisfait; le module d'Young effectif est diminué. Endommagement et localisation de la déformation ont lieu progressivement. Des failles inverses et normales apparaissent, ainsi qu'un coin non déformé au-dessus du réservoir. Ce pattern est observé dans les expériences analogiques et sur le terrain. D'après Got et Amitrano, 2017.

Production scientifique (articles scientifiques, actes de congrès... liés au projet)

Articles Rang A :

Got, J.-L., Carrier, A., Marsan, D., Jouanne, F., Vogfjörd, K. et T. Villemin, 2017, An analysis of the nonlinear magma-edifice coupling at Grimsvötn volcano (Iceland), *J. Geophys. Res.*, 10.1002/2016JB012905 (online, Janvier 2017).

En cours :

Got, J.-L., and D. Amitrano, Damage and strain localization around a shallow-level magma reservoir, to be submitted to *J. Geophys. Res.*, 2017

Conférences :

- 1. Got, J.-L., Carrier, A., Marsan, D.**, Non-linear magma-edifice coupling at Grimsvötn volcano (Iceland), IUGG – CMG, Paris, Juillet 2016.
- 2. Got, J.-L., Carrier, A., Marsan, D., Amitrano, D., Jouanne, F., Hreinsdottir, S., Vogfjörd, K.**, Damage and strain localization in modelling pre-eruptive deformation, GEOMOD, La Grande-Motte, Octobre 2016.
- 3. Got, J.-L., Amitrano, D., Carrier, A., Marsan, D., Jouanne, F., Vogfjörd, K.**, 2017, Progressive damage and strain localization in modelling pre-eruptive deformation : analytical and numerical results, GEOPROC, Paris, 5-7 Juillet 2017.

Bilan financier succinct (*avec suivant les cas : co-financements éventuels, équipements achetés, missions, recrutements divers, fonctionnements divers...*)

2015 :

Mission AUSSOIS (73) : 463 Euros, participation au workshop ALERT GEOMATERIALS 2015, rencontre et travail en commun avec Chloé ARSON (participante au projet, co-conceptrice et co-réalisatrice de THETASTOCK), Thomas POULET (CSIRO, Australie) et Manolis VEVEAKIS (USW, Australie), concepteurs et réalisateurs de l'extension REDBACK de MOOSE. THETASTOCK et REDBACK sont deux codes numériques de modélisation hydro-mécanique avec prise en compte de l'endommagement. Choix du code, installation de MOOSE et REDBACK, début de travail avec MOOSE et REDBACK (Octobre → Décembre 2015). Préparation du stage de Manon SEVAUX.

Maintenance COMSOL : 935 Euros. COMSOL a été utilisé pour réaliser une modélisation élasto-plastique préliminaire du problème, ainsi que des tentatives d'implémentation de l'endommagement élastique.

TOTAL 2015 : 1398 Euros

2016 :

Stage de Manon SEVAUX (Février – Juillet 2016) : 2369 Euros. Manon (étudiante M2R Maths Appliquées Université Montpellier) a utilisé MOOSE et REDBACK pour modéliser l'endommagement et la déformation autour d'un réservoir pressurisé proche de la surface (voir bilan d'activité).

Mission PARIS, Juin 2016 : 615 Euros, mission et inscription pour participation au congrès IUGG – CMG2016 (Conference on Mathematical Geophysics) accueilli à Jussieu par l'IPG Paris. Communication n° 1.

Mission MONTPELLIER, fin Octobre 2016 : 333 Euros, inscription au congrès GEOMOD (frais de transport pris par ailleurs). Communication n° 2.

Achat d'un ordinateur portable Mac Book Pro (mi-October 2016) : 2283 Euros.

TOTAL 2016 : 5600 Euros

TOTAL 2015 + 2016 : 6998 Euros



Ce projet est soutenu par le Laboratoire d'Excellence OSUG@2020 (ANR10 LABX56) financé par le programme d'Investissements d'Avenir lancé par l'Etat et mis en oeuvre par l'ANR.



Annexes si besoin ou lien sur des sites existants et pérennes jusqu'à la fin du Labex (2020)