

# Sujet de thèse : Physico-chimie de la friction et la fracture : comment la chaleur impacte les instabilités mécaniques

Physico-chemistry of friction and fracture, how heat impacts mechanical instabilities

*Directeur de thèse : Renaud Toussaint (HDR, DR CNRS, ITES), co-encadrant: Alain Cochard (MCF, ITES). Thèses actuellement encadrées par RT : 1 (2\*0.5 thèses coencadrées, cotutelles à l'étranger : Shahar Ben Zeev, financement principal d'Israel, encadrement principal E Aharonov, Université de Jérusalem, et Laci Alonso, financement principal à Cuba, encadrement principal Ernesto Altshuler, Université de La Havane).*

*Coencadrement : Stéphane Santucci (CR CNRS, Laboratoire de Physique, ENS de Lyon). Cotutelle envisagée: Université d'Oslo. Centre d'excellence PoreLab, The Njord Center, Physics Dept. Codirecteur de thèse : Pr. KJ Maloy*

Le fonctionnement des failles, comme la propagation des fractures en milieu naturel, a lieu dans des milieux désordonnés, où des aspérités induisent ralentissements et accélérations. Le résultat de cette intermittence est une distribution des événements de forme et largeur qui dépend de l'échelle d'observation (Tallakstad et al., 2013). Dans des comparaisons de modèles et d'expériences, on a mis en évidence que le comportement de la mécanique de fractures en milieu désordonné est dépendant, à la fois des distributions de ténacité des hétérogénéités sur le chemin de la fracture (Tallakstad et al., 2011), et des fluctuations thermiques qui permettent à la fracture de franchir ces hétérogénéités (Lengliné et al., 2011). La prise en compte de ces deux types de désordre, matériel et thermique, permet de rendre compte de nombreux aspects de la dynamique de fracture interfaciale, dans la statistique des événements, et dans la dynamique rapide et la dynamique lente (asismique) (Cochard et al., 2019, Vincent-Dospital et al., 2021a). Durant la thèse de Tom Vincent-Dospital, on a également mis en évidence, dans une géométrie de fracture en mode I (en ouverture), que les effets thermiques, et notamment la libération d'énergie par effet Joule en pointe de fissure, peuvent jouer un rôle majeur dans la transition de rupture lente (en régime sous-critique, dit de creep) à rupture rapide. La prise en compte de ces effets permet d'expliquer des phénomènes tel que la fractoluminescence dans le pelage de bandes adhésives avec glue polymérique, et la courbe de charge reliant taux de libération d'énergie  $G$  et vitesse de rupture  $v$  dans ce matériau, ou dans la rupture de PMMA (Vincent-Dospital et al., 2020a). Dans ce cadre, le passage d'une vitesse de déformation lente à une vitesse de rupture rapide correspond à une transition de phase du premier ordre.

On a également montré que le modèle construit permet de prédire le taux de libération critique  $G_c$  pour une très large gamme de matériaux à partir de l'observation de la déformation lente (Vincent-Dospital et al., 2021b). Il est également possible d'expliquer de façon générique la transition fragile-ductile de matériaux observée à la base de la croûte terrestre comme un point critique (Vincent-Dospital et al., 2020b).

Des développements de ces modèles et des expériences d'application sont des pistes de recherche pour la thèse proposée:

D'un point de vue numérique, on compte étendre ce type de modèle en couplant à la fois la prise en compte des hétérogénéités matérielles (désordre gelé) et celle de chauffe en pointe de fissure (fluctuations temporelles). Ceci sera fait en étendant le modèle développé précédemment au laboratoire pour les deux configurations séparément.

D'autre part numériquement et théoriquement également, l'extension de ce type de modèle à la géométrie de mode II permettra d'explorer les conséquences de ces différents types de désordre sur les instabilités de friction, à l'oeuvre dans la dynamique des failles. On étudiera également l'influence sur la dynamique de l'évolution du champ de température dû au transport de chaleur. On s'intéressera aux conséquences des champs de température obtenue sur de possibles phénomènes de triboluminescence (émission de lumière durant le frottement), et sur les transitions de phase dans les minéraux. En effet, des phénomènes de « flash heating » sont observés durant la friction solide dans des roches, et les miroirs de faille sont couramment le lieu de phases minéralogiques particulières sur quelques micromètres.

Expérimentalement, on confrontera ces modèles à plusieurs types d'expériences : on étudiera tout d'abord l'élévation de température dans un dispositif de plaques de PMMA avec interface frottante sollicitée en cisaillement, avec résolution de la déformation par trois techniques: suivi de la déformation latérale par caméra rapide et analyse de déformation (vélocimétrie par corrélation d'images), effet de chauffe observé latéralement par caméra à infrarouge, analyse des émissions de lumière à l'aide d'un photomultiplicateur.

On étudiera également l'effet de chauffe localisée dans la propagation d'une fracture interfaciale, pour observer comment une telle chauffe peut piloter la propagation d'une fracture de façon contrôlée. On travaillera avec des matériaux transparents solides permettant la sollicitation mécanique et la chauffe par laser. Partant d'un dispositif de fracture interfaciale de PMMA, à Oslo (collaboration PoreLab), ou de pelage d'adhésif, à Lyon, on étudiera les effets de l'énergie et la taille d'un pulse en avant du front de fracture (collaboration ENS de Lyon).

Enfin, on étudiera expérimentalement comment la modification des propriétés de conductivité thermique du matériau autour d'une interface peut impacter sa résistance mécanique. Pour ce faire, on préparera des interfaces par sputtering, dépôt d'une couche métallique, d'épaisseur contrôlée, avant de préparer un matériau cohésif en chauffant l'interface sous pression, comme préalablement fait dans du PMMA sans une telle couche. La théorie prévoit la manière dont la présence d'une telle

couche conductrice de chaleur peut impacter la fracturation le long de l'interface – une bonne conductivité limitant la chauffe durant la fracturation, et augmentant la résistance. Des expériences de mode I sur de telles interfaces systématiquement préparées permettront de mettre la théorie à l'épreuve. Certains volets expérimentaux seront conduits en collaboration avec des expérimentateurs de l'Université d'Oslo, et l'ENS de Lyon.

Ce sujet s'inscrit dans la prolongation des travaux de la thèse de Tom Vincent-Dospital, mêmes encadrants, soutenue en Novembre 2020, qui est sélectionné pour un Prix de Thèse de l'Université de Strasbourg en 2021 pour ces travaux.

Le doctorant fera partie de l'Ecole Doctorale 413, Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Strasbourg (<http://ed413.unistra.fr/?lang=fr>), la thèse aura lieu à l'Institut Terre et Environnement de Strasbourg (<http://ites.unistra.fr/>), Equipe Géophysique Expérimentale. La thèse sera en cotutelle avec l'Université d'Oslo, centre d'excellence PoreLab, the Njord center, Département de Physique.

Contacts : [renaud.toussaint@unistra.fr](mailto:renaud.toussaint@unistra.fr), <http://ites.unistra.fr/renaud/>, [k.j.maloy@fys.uio.no](mailto:k.j.maloy@fys.uio.no)

#### References:

Toussaint, R., O. Lengliné, S. Santucci, T. Vincent-Dospital, M. Naert-Guillot, and K.J. Måløy. How cracks are hot and cool: a burning issue for paper, *Soft Matter*, 12, 5563-5571, 2016. DOI: 10.1039/C6SM00615A

Ca chauffe dans les fractures, communiqué du CNRS: <http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article5099>

Tallakstad, K.T., R. Toussaint, S. Santucci, K.J. Måløy, The non-Gaussian nature of fracture and the survival of fat-tail exponents, *Physical Review Letters*, 110, 14550, 2013.

O. Lengliné, R. Toussaint, J. Schmittbuhl, J.E. Elkhoury, J.-P. Ampuero, K.T. Tallakstad, S. Santucci, K.J. Måløy Average crack-front velocity during subcritical fracture propagation in a heterogeneous medium, *Physical Review E*, 84, pp. 036104, 2011

Tallakstad, K.T., R. Toussaint, S. Santucci, J. Schmittbuhl, K.J. Måløy, Local dynamics of a randomly pinned crack front during creep and forced propagation: An experimental study, *Physical Review E*, 2011

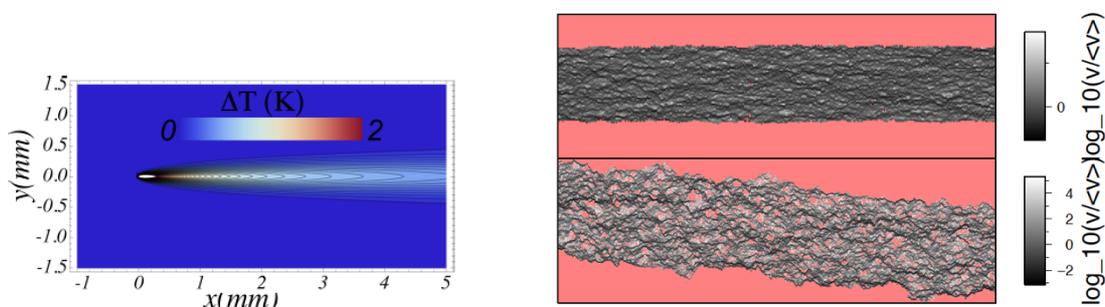
Cochard, A., O. Lengliné, K.J. Måløy, R. Toussaint, Thermally activated crack fronts propagating in pinning disorder: simultaneous brittle/creep behaviour depending on scale, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 377 (2136), 20170399, 2019

Vincent-Dospital, T., Toussaint, R., Santucci, S., Vanel, L., Bonamy, D., Hattali, L., Cochard, A., Flekkøy, E.G. & Måløy, K. J. How heat controls fracture: the thermodynamics of creeping and avalanching cracks. *Soft Matter*, 16(41), 9590-9602, 2020a.

Vincent-Dospital, T., R. Toussaint, A. Cochard, K.J. Måløy, E.G. Flekkøy. Thermal weakening of cracks and brittle-ductile transition of matter: A phase model. *Physical Review Materials* 4 (2), 023604, 2020b

Vincent-Dospital, T., A. Cochard, S. Santucci, K.J. Måløy, R. Toussaint, Thermally activated intermittent dynamics of creeping crack fronts along disordered interfaces, submitted to *Scientific Reports*, in review. arXiv preprint arXiv:2010.06865, 2021a

Vincent-Dospital, T., R. Toussaint, A. Cochard, E.G. Flekkøy, & K.J. Måløy. Thermal dissipation as both the strength and weakness of matter. A material failure prediction by monitoring creep. *Soft Matter*, 2021, 17, 4143-4150. DOI: [10.1039/D0SM02089C](https://doi.org/10.1039/D0SM02089C) 2021b



Gauche : champ de température simulé lors d'une propagation de fracture. Droite : vitesse de fracture lors d'une propagation de rupture dans un matériau hétérogène