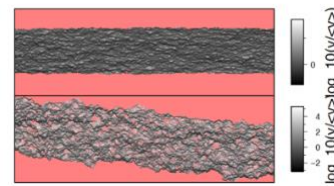
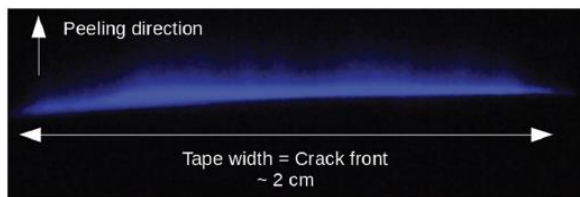


Sujet de thèse de doctorat: Physico-chimie de la friction et la fracture : comment la chaleur impacte les instabilités mécaniques (*english version follows*)

Thèse à l'Université de Strasbourg, ITES Institut Terre et Environnement de Strasbourg, UMR7063 CNRS / Université de Strasbourg / ENGEES. Cette thèse est entièrement financée dans le cadre de l'ANR HotTips, collaboration entre l'Université de Strasbourg (ITES), le Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon, l'Institut Lumière Matière de l'Université de Lyon I, le groupe SPHYNX du CEA de Saclay, et le centre d'excellence Porous Media Laboratory, Njord, Institut de Physique de l'Université d'Oslo (Norvège).

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. Dans des modèles et des expériences, on a mis en évidence que le comportement de la mécanique de fractures est dépendant, à la fois des distributions de ténacité des hétérogénéités sur le chemin de la fracture ¹, et des fluctuations thermiques qui permettent à la fracture de franchir ces hétérogénéités ². 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) ^{3,4,5}. On a mis en évidence, dans une géométrie de fracture en ouverture (mode I), que la libération d'énergie par effet Joule en pointe de fissure peut jouer un rôle majeur dans la transition de rupture lente (en régime sous-critique, dit de creep) à rupture rapide : dans certains cas, l'échauffement très localisé accélère considérablement la réaction de rupture à l'échelle moléculaire, source du comportement de rupture macroscopique.

La prise en compte de ces effets permet d'expliquer des phénomènes tels que la fractoluminescence dans le pelage de bandes adhésives, 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 ⁶. 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.



Gauche : fractoluminescence observée lors de la phase rapide de propagation du front de pelage d'un adhésif ⁶. Droite : vitesse de fracture lors d'une propagation de rupture dans un matériau hétérogène, avec prise en compte de température finie (haut : simulation, bas : expérience – champ de 3 mm de large) ⁴.

On a également montré que le modèle construit permet de prédire le taux de libération d'énergie critique G_c (la résistance macroscopique) pour une très large gamme de matériaux à partir de l'observation de la déformation ⁷. 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 ⁸.

Des développements de ces modèles et des expériences d'application forment le sujet de thèse proposée :

D'un point de vue numérique, on étendra ce 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 l'impact de ces différents types de désordre sur les instabilités de friction, à l'œuvre 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, et ses conséquences sur la 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.

Expérimentalement, on confrontera ces modèles à plusieurs types d'expériences, conduites en collaboration à Lyon, Oslo et Saclay : on étudiera tout d'abord l'élévation de température de fracture de PMMA, ou de pelage d'adhésif, à Lyon. Durant ces expériences, les processus à l'œuvre seront résolus 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 et la température de pointe à l'aide d'un photomultiplicateur.

Le/la candidat-e aura un bon niveau en physique ou géophysique, numérique ou expérimentale. Il ou elle sera intéressé-e à développer des méthodes de mécanique, physique statistique, sciences de matériaux, et le souhait d'intégrer une équipe avec des collaborateurs internationaux. Le/la doctorant-e fera partie de l'Ecole Doctorale 413, Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Strasbourg. La thèse aura lieu à l'ITES (<http://ites.unistra.fr/>), potentiellement en cotutelle avec l'Université d'Oslo, centre d'excellence PoreLab, the Njord center, Département de Physique.

Contacts (candidature ou renseignements) : renaud.toussaint@unistra.fr, <http://ites.unistra.fr/renaud/>, k.j.maloy@fys.uio.no

Directeur de thèse : Renaud Toussaint (DR CNRS, ITES), renaud.toussaint@unistra.fr, co-encadrant: Alain Cochard (MCF, ITES), Coencadrement : Stéphane Santucci (CR CNRS, Laboratoire de Physique, ENS de Lyon). Cotutelle possible: Université d'Oslo. Centre d'excellence PoreLab, The Njord Center, Physics Dept, avec Codirection de thèse : Pr. KJ Måløy

References:

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

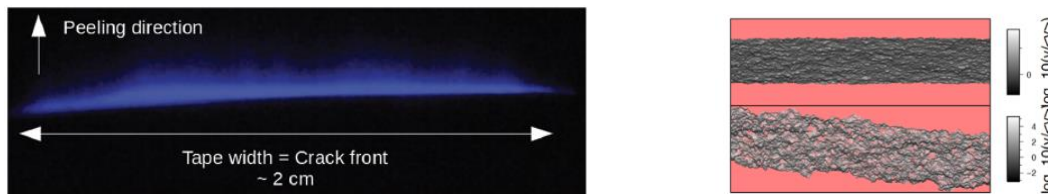
1. Tallakstad, K.T., R. Toussaint, S. Santucci, J. Schmittbuhl, K.J. Måløy, Local dynamics of a randomly pinned crack front during creep and forced propagation: An experimental study, *Physical Review E*, 2011
2. O. Lengliné, R. Toussaint, J. Schmittbuhl, J.E. Elkhoury, J.-P. Ampuero, K.T. Tallakstad, S. Santucci, K.J. Måløy Average crack-front velocity during subcritical fracture propagation in a heterogeneous medium, *Physical Review E*, 84, 036104, 2011
3. 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
4. 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
5. Vincent-Dospital, T., A. Cochard, S. Santucci, K.J. Måløy, R. Toussaint, Thermally activated intermittent dynamics of creeping crack fronts along disordered interfaces, *Scientific Reports*, 11, 20488, 2021a
6. 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.
7. 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
8. 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

PhD thesis topic: Physical chemistry of friction and fracture: how heat impacts mechanical instabilities (*French version above*)

PhD Thesis at the University of Strasbourg, ITES Institut Terre et Environnement de Strasbourg, UMR7063 CNRS / University of Strasbourg / ENGEES. This thesis is fully funded by the ANR HotTips, a collaboration between the University of Strasbourg (ITES), the Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon, the Institut Lumière Matière of the University of Lyon I, the SPHYNX group of CEA Saclay, and the Porous Media Laboratory center of excellence, Njord, Institute of Physics of the University of Oslo (Norway).

Like the propagation of fractures, the sliding on seismogenic faults takes place in disordered environments, where asperities induce slowdowns and accelerations. In models and experiments, it has been shown that fracture mechanics are dependent on both the fracture toughness distributions of the heterogeneities in the path of the fracture ¹, and the thermal fluctuations that allow the fracture to cross these heterogeneities ². Taking into account these two types of disorder, material and thermal, makes it possible to account for many aspects of interfacial fracture dynamics, in the statistics of events, and in fast and slow (aseismic) dynamics ^{3,4,5}. In an open fracture geometry (mode I), it has been demonstrated that the release of energy by the Joule effect at the crack tip can play a major role in the transition from slow fracture (in the sub-critical creep regime) to rapid fracture: in some cases, very localized heating considerably accelerates the fracture reaction at the molecular scale, the source of macroscopic fracture behavior.

Taking these effects into account helps explain phenomena such as fractoluminescence in the peeling of adhesive tapes, and the load curve linking energy release rate G and rupture speed v in this material, or in the rupture of PMMA ⁶. In this context, the transition from a slow strain rate to a fast rupture rate corresponds to a first-order phase transition.



Left: fractoluminescence observed during the rapid propagation phase of an adhesive peel front ⁶. Right: fracture velocity during fracture propagation in a heterogeneous material, with finite temperature taken into account (top: simulation, bottom: experiment - 3mm wide field) ⁴.

It has also been shown that the model constructed can predict the critical energy release rate G_c (the macroscopic strength) for a very wide range of materials from the observation of deformation ⁷. It is also possible to generically explain the brittle-ductile transition of materials observed at the base of the Earth's crust as a critical point ⁸.

Developments of these models and application experiments form the subject of the proposed thesis:

From a numerical point of view, we will extend this model by coupling both the consideration of material heterogeneities (quenched disorder) and that of crack tip heating (temporal fluctuations). This will be done by extending the model previously developed in the laboratory for the two configurations separately.

Numerically and theoretically, the extension of this type of model to mode II geometry will also enable us to explore the impact of these different types of disorder on the friction instabilities at work in fault dynamics. We will also study the influence on dynamics of the evolution of the temperature field due to heat transport, and its consequences on triboluminescence (light emission during friction), and on phase transitions in minerals. Indeed, flash heating phenomena are observed during solid friction in rocks, and fault mirrors are commonly the site of particular mineralogical phases.

Experimentally, we will compare these models with several types of experiments, conducted in collaboration at Lyon, Oslo and Saclay: firstly, we will study the temperature rise of PMMA fracture, or adhesive peeling, in Lyon. During these experiments, the processes at work will be resolved using three techniques: lateral deformation monitoring using a high-speed camera and deformation analysis (image correlation velocimetry), heating effect observed laterally using an infrared camera, analysis of light emissions and peak temperature using a photomultiplier.

The candidate will have a good level in physics or geophysics, either numerical or experimental. He/she will be interested in developing methods in mechanics, statistical physics and materials science, and in joining a team with international collaborators. The PhD student will be part of the Ecole Doctorale 413, Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Strasbourg. The PhD thesis will be carried at ITES (<http://ites.unistra.fr/>), potentially in cotutelle (joint PhD) with the University of Oslo, PoreLab center of excellence, the Njord center, Department of Physics.

Contacts (application or information): renaud.toussaint@unistra.fr, <http://ites.unistra.fr/renaud/>, k.j.maloy@fys.uio.no

Directeur de thèse : Renaud Toussaint (DR CNRS, ITES), renaud.toussaint@unistra.fr, co-encadrant: Alain Cochard (MCF, ITES), Coencadrement : Stéphane Santucci (CR CNRS, Laboratoire de Physique, ENS de Lyon). Cotutelle possible: Université d'Oslo. Centre d'excellence PoreLab, The Njord Center, Physics Dept, avec Codirection de thèse : Pr. KJ Måløy

References:

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

1. 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
2. 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, 036104, 2011
3. 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
4. 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
5. Vincent-Dospital, T., A. Cochard, S. Santucci, K.J. Måløy, R. Toussaint, Thermally activated intermittent dynamics of creeping crack fronts along disordered interfaces, *Scientific Reports*, 11, 20488, 2021a
6. 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.
7. 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
8. 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