



HAL
open science

Rôle des variations positives de température sur les pentes rocheuses

Véronique Merrien-Soukatchoff, Muriel Gasc-Barbier

► **To cite this version:**

Véronique Merrien-Soukatchoff, Muriel Gasc-Barbier. Rôle des variations positives de température sur les pentes rocheuses. JAG - Journées Aléas Gravitaires, May 2022, Montpellier, France. hal-03845496

HAL Id: hal-03845496

<https://hal.science/hal-03845496>

Submitted on 9 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rôle des variations positives de température sur les pentes rocheuses

Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF¹, Muriel Gasc-Barbier²

¹ Laboratoire Géomatique & Foncier (EA 4630), Conservatoire National des Arts et Métiers, Case courrier EPN01-C, 2, rue Conté, CEDEX 03, 75141 Paris, France; veronique.merrien@lecnam.net

² GeoCoD, Cerema, avenue Albert Einstein, CS 70499, 13593 Aix en Provence, CEDEX 03, France

RÉSUMÉ : Le rôle des fluctuations de température (positive) sur la déstabilisation ou le déplacement des versants rocheux est de plus en plus évoqué. Le résumé recense et classe les publications autour de ce thème, impliquant des sites *in situ*, en fonction des observations, des mesures, des mécanismes explicatifs et esquisse quelques défis à relever dans les années à venir.

Mots-clés : roche, talus, rupture, thermomécanique, *in situ*

Introduction

Les effets thermomécaniques sur les affleurements rocheux sont de plus en plus cités depuis une vingtaine d'années. Ce résumé vise à répertorier les publications autour de ce thème, impliquant des sites *in situ* (hors expérimentations en laboratoire), et à les classer selon les observations, les mesures et les mécanismes possibles.

Observations

Depuis une vingtaine d'années, les observations de rupture ou de mouvements de falaises et de versants attribués à des effets thermiques se multiplient. Des événements attribués jusqu'ici au gel dégel se voient parfois reclassés comme consécutifs aux variations de température cycliques ou comme résultant de températures exceptionnelles.

Deux types d'événements sont observés : des ruptures superficielles, en pelure d'oignon, souvent associées à de fortes insulations, par exemple (Collins and Stock 2016; Eppes 2022; Eppes et al. 2010; Leith et al. 2014; Vargas et al. 2004) et des ruptures de volumes rocheux plus importants (Gunzburger et al. 2004; Merrien-Soukatchoff and Gasc-Barbier 2020; Vargas et al. 2009)

Les ruptures en pelure d'oignon se répètent sur les mêmes sites et peuvent donc être suivies et instrumentées. Pour les volumes importants, il s'agit souvent de phénomènes non récurrents attribués à des causes thermomécaniques faute d'autres facteurs déclencheurs, mais pour lesquels il n'existait pas de mesures météorologiques sur site au moment de l'événement. Des mesures peuvent être mises en place a posteriori pour expliquer les événements et être disponibles en cas de phénomène similaire. Faute d'inventaires et d'observations comparables systématiques, il est difficile de juger si ce classement en 2 catégories est pertinent ou s'il s'agit d'un phénomène unique pouvant mettre en jeu des volumes rocheux allant du mm^3 au dam^3 . Cependant, les gros volumes semblent délimités par des fractures macroscopiques préexistantes alors que les ruptures en pelures d'oignon semblent se développer dans la matrice rocheuse (cette dernière pouvant présenter de la microfracturation).

Mesures

Parallèlement aux observations, des mesures de température, déplacement, déformation, variation d'angle en surface et en profondeur se développent.

Si les mesures de températures dans l'air sont fréquentes, les mesures dans les massifs rocheux et particulièrement en profondeur sont plus rares. Elles ont commencé à être développées dans les années 80 par les géomorphologues, plutôt dans des environnements soumis à des périodes de gel. On peut citer les mesures de (Coutard and Francou 1989; Gruber et al. 2004; Hall 1999; Messenzehl and Dikau 2017) dans les Alpes. Dans un environnement plus tempéré (Safanda 1999) a mesuré la température dans des forages dans les monts Krušné Hory en République tchèque, tandis que les mesures de (Jenkins et Smith 1990) se localisent aux îles Canaries et celles à haute fréquence de (Molaro and McKay 2010) concernent des environnements désertiques hyperarides.

Les mesures de température en profondeur peuvent permettre d'en déduire la diffusivité thermique *in situ* (Gunzburger and Merrien-Soukatchoff 2011) et une température moyenne équivalente de surface (Clément et al. 2008). (Gunzburger and Merrien-Soukatchoff 2011) ont montré l'influence de la température de l'air et du rayonnement solaire sur la température de la roche et confirment le rôle de

l'angle et de l'orientation de la pente mentionnés par (Safanda 1999). Les premiers proposent un modèle pour estimer le rayonnement solaire qui est rarement mesuré sur les sites. Les mesures de température de la Roque Gageac citées par Gasc-Barbier et al. (2021) donnent des valeurs de conductivités telles qu'il faut invoquer le rôle thermique des fractures ou l'insuffisante isolation du forage pour les expliquer. Notons que la température de la roche en surface peut être obtenue par thermographie infrarouge (Fiorucci et al. 2018).

Les mesures de déplacements liées aux variations de température peuvent être séparées entre les mesures concernant l'ensemble du massif rocheux et celles mesurant un déplacement le long ou dans des fractures. (Krähenbühl 2004), (Gunzburger et al. 2004), (Watson et al. 2004), sont parmi les premiers à avoir cherché à identifier des mouvements globaux de massif rocheux liés aux variations de température. (Gunzburger et al. 2005) considèrent que les mesures topographiques sont incapables de mesurer le déplacement d'ensemble d'un versant, en l'absence des fractures impliquées dans ce mouvement. Des mesures de déviation angulaire par inclinomètre sont aussi parfois citées (Clément 2008), (Gischig et al. 2011b). Plus récemment, les techniques de télédétection telles que le Lidar, la thermographie infrarouge (Guerin et al. 2020), la photogrammétrie, le radar au sol sont utilisés dans le but de capter des variations topographiques liées à des effets thermiques.

De nombreux auteurs mesurent des variations d'ouverture de fissures associées à des variations de température (Bakun-Mazor et al. 2011; Cloutier et al. 2015; Collins et al. 2018; Gischig et al. 2011a; Grøneng et al. 2011; Mufundirwa et al. 2011; Taboada et al. 2017; Vlcko et al. 2009), (Gasc-Barbier et al. 2020), (Marmoni et al. 2020). Ces mesures sont toujours superficielles du fait de la difficulté d'instrumenter des fractures profondes. La dérive éventuelle des instruments eux-mêmes n'est pas toujours clairement discutée afin de l'exclure.

Les mesures de déformation par extensomètre ou par jauges de déformations associées à une mesure de température en profondeur sont moins fréquentes. Les déformations sont mesurées sur des bases de quelques centimètres (Clément 2008), à quelques mètres dans les extensomètres. Lorsque les déformations sont mesurées avec des extensomètres, elles sont susceptibles de traverser des fractures qui ont un effet sur la déformation, mais aussi sur le champ de température dans le forage du forage. Seuls les extensomètres accumulent la déformation sur une épaisseur plurimétrique et intègrent donc un mécanisme en profondeur.

Les différentes mesures citées sont généralement ponctuelles et superficielles et posent le problème de leur intégration dans un modèle conceptuel d'ensemble. Par ailleurs, il serait préférable pour une bonne compréhension des mécanismes de disposer de mesures fréquentes et fiables sur de longues périodes, sans dérive dans le temps, ce qui pose le problème de la fiabilité, l'absence de dérive et la stabilité des équipements et des fonds pour permettre le suivi.

Par ailleurs, les instruments peuvent influencer l'appréciation du mécanisme de déformation, de déplacement voir de rupture. Les fissuromètres placés sur des fractures existantes induisent une perception "discontinue" alors que les extensomètres et les inclinomètres qui intègrent les déplacements ou les variations d'angles suggèrent un massif rocheux continu.

Calculs, mécanismes et modélisation proposés

Différents calculs, parfois analytiques, mais plus souvent numériques, sont proposés à partir des observations thermomécaniques et de mesures sur les pentes. Lorsque les modèles tentent d'expliquer les effets superficiels, ils considèrent généralement la fracturation, alors que la compréhension du comportement globale d'une pente se base souvent sur une perception continue du massif rocheux.

De nombreuses thermomécaniques sont mises en œuvre autour de l'idée de propagation de rupture due aux cycles thermiques et à la fatigue (Alcaino-Olivares et al. 2021; Clément 2008; Collins et al. 2018; Stock et al. 2012; Vargas et al. 2009). (Eppes 2022) précisent les mécanismes liés à la croissance critique ou sous-critique des fractures. Elle ne fait aucune distinction de taille entre la propagation des fractures et l'altération mécanique produisant des sédiments clastiques ou de plus grands volumes de chutes de pierres. Il est amusant de noter que des modèles continus sont souvent utilisés pour évaluer un champ de contraintes qui sera ensuite utilisé pour expliquer la propagation des fractures. Cette démarche peut s'avérer problématique, car les grandes fractures profondes

impliquées dans une rupture de grand volume ont un rôle dans la distribution des températures dans la roche et, par ailleurs, les fractures modifient l'état de contrainte dans le massif rocheux.

La modélisation discontinue utilisée par exemple par (Gunzburger et al. 2005) et (Bakun-Mazor et al. 2020) est plutôt utilisée pour comparer les déplacements in situ mesurés et modélisés, mais cette modélisation soulève de nombreuses questions sur les propriétés mécaniques et thermiques à attribuer aux fractures. Par exemple (Messenzehl and Dikau 2017) considèrent que la faible porosité et perméabilité de la roche dans leur site d'étude peut encore justifier l'utilisation d'un modèle de conduction pour leur site d'étude.

Défis et conclusions

Les observations et des mesures mentionnant les effets des variations positives de températures sur les pentes rocheuses se multiplient et il est probable sur nous ne sommes qu'au début de la collecte des données. Des inventaires les plus importants pourraient confirmer si la répartition entre la rupture superficielle des nappes et le plus grand volume de chutes de pierres impliquant des fractures préexistantes est pertinente ou non.

L'influence de la température sur les mesures elles-mêmes est à clairement discuter. L'insolation n'est pas suffisamment mesurée et prise en compte.

Les propriétés thermiques in situ des fractures et au-delà de l'ensemble du massif rocheux sont encore mal prises en compte dans les calculs thermomécaniques de surface alors qu'il existe une littérature riche à la fois liée à la géothermie et aux stockages souterrains, mais aussi des mesures globales faites par les géophysiciens (voir par exemple (Tabbagh 1985)).

Le rôle de la propagation de la rupture, de la fatigue ou du fluage potentiel doit être clarifié. La preuve de ces mécanismes est difficile à trouver, jusqu'à présent seule leur potentialité est souvent montrée. Le développement d'observations au laboratoire compatible avec les observations in situ (niveau de température), cyclicité seraient utiles pour mieux comprendre les phénomènes thermomécaniques de surface.

Références

- Alcaino-Olivares, R., Leith, K., Ziegler, M. & Perras, M. 2021. Thermo-mechanical fatigue cracking of the bedrock on an island in the Baltic Sea. *GEONIAGARA*, Niagara Falls, Canada.
- Bakun-Mazor, D., Hatzor, Y.H., Glaser, S.D. & Santamarina, J.C. 2011. Climatic Effects On Key-block Motion: Evidence From the Rock Slopes of Masada World Heritage Site. In: Association, A.R.M. (ed.) *45th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium* American Rock Mechanics Association, San Francisco, California.
- Bakun-Mazor, D., Keissar, Y., Feldheim, A., Detournay, C. & Hatzor, Y.H. 2020. Thermally-Induced Wedging-Ratcheting Failure Mechanism in Rock Slopes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **53**, 2521-2538, doi: 10.1007/s00603-020-02075-6.
- Clément, C. 2008. *Auscultation d'un versant rocheux soumis aux sollicitations thermiques naturelles. Cas des Rochers de Valabres (Alpes-Maritimes)* PhD, INPL, Ecole des Mines de Nancy.
- Clément, C., Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V. & Dünner, C. 2008. Monitoring of natural thermal strains using hollow cylinder strain cells: The case of a large rock slope prone to rockfalls. In: Chen, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F. & Ho, K. (eds.) *Landslides and Engineered slopes, From the past to the future, Proc. 10th Int. Symp. Landslides (ISL)*. Taylor and Francis Group (London), Xi'an (China), 1143-1149.
- Cloutier, C., Locat, J., Charbonneau, F. & Couture, R. 2015. Understanding the kinematic behavior of the active Gascons rockslide from in-situ and satellite monitoring data. *Engineering Geology*, **195**, 1-15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.017>.
- Collins, B.D. & Stock, G.M. 2016. Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. *Nature Geosci*, doi: 10.1038/ngeo2686
<http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/abs/ngeo2686.html#supplementary-information>.
- Collins, B.D., Stock, G.M., Eppes, M.-C., Lewis, S.W., Corbett, S.C. & Smith, J.B. 2018. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. *Nature Communications*, **9**, 762, doi: 10.1038/s41467-017-02728-1.
- Coutard, J.P. & Francou, B. 1989. Rock temperature measurements in two alpine environments: implications for frost shattering. *Arctic & Alpine Research*, **21**, 399-416.
- Eppes, M.-C. 2022. 3.03 - Mechanical Weathering: A Conceptual Overview. In: Shroder, J.F. (ed.) *Treatise on Geomorphology (Second Edition)*. Academic Press, Oxford, 30-45.
- Eppes, M.C., McFadden, L.D., Wegmann, K.W. & Scuderi, L.A. 2010. Cracks in desert pavement rocks: Further insights into mechanical weathering by directional insolation. *Geomorphology*, **123**, 97-108.
- Fiorucci, M., Marmoni, G.M., Martino, S. & Paciello, A. 2018. Experimental Evidences of Thermo-Mechanical Induced Effects on Jointed Rock Masses Through Infrared Thermography and Stress-Strain Monitoring. *ISRM European Rock Mechanics Symposium - EUROCK 2018*.

- Gasc-Barbier, M., Merrien-Soukatchoff, V. & Villarraga-Diaz, C. 2020. Effet de cycles thermiques sur un massif rocheux : observations et mesures au laboratoire et in situ. *Rev. Fr. Geotech.*, **4**.
- Gischig, V.S., Moore, J.R., Evans, K.F., Amann, F. & Loew, S. 2011a. Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 1. Conceptual study of a simplified slope. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **116**, F04010, doi: 10.1029/2011jg002006.
- Gischig, V.S., Moore, J.R., Evans, K.F., Amann, F. & Loew, S. 2011b. Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 2. The Randa rock slope instability. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **116**, F04011, doi: 10.1029/2011jg002007.
- Grøneng, G., Christiansen, H.H., Nilsen, B. & Blikra, L.H. 2011. Meteorological effects on seasonal displacements of the Åknes rockslide, western Norway. *Landslides*, **8**, 1-15, doi: 10.1007/s10346-010-0224-x.
- Gruber, S., Hoelzle, M. & Haeberli, W. 2004. Rock-wall temperatures in the Alps: Modelling their topographic distribution and regional differences. *Permafrost and Periglacial Processes*, **15**, 299-307.
- Guerin, A., Jaboyedoff, M., Collins, B.D., Stock, G.M., Derron, M.-H., Abellán, A. & Matasci, B. 2020. Remote thermal detection of exfoliation sheet deformation. *Landslides*, doi: 10.1007/s10346-020-01524-1.
- Gunzburger, Y. & Merrien-Soukatchoff, V. 2011. Near-surface temperatures and heat balance of bare outcrops exposed to solar radiation. *Earth Surface Processes and Landforms*, **36**, 1577-1589.
- Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V. & Guglielmi, Y. 2005. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope (France). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **42**, 331-349.
- Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V., Senfaute, G., Guglielmi, Y. & Piguet, J.-P. 2004. Field investigations, monitoring and modeling in the identification of rock fall causes. *In: Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B. & Sayao, A.S.F. (eds.) Landslides: evaluation and stabilization, Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides*. Taylor & Francis Group, Rio de Janeiro, 557-563.
- Hall, K. 1999. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. *Geomorphology*, **31**, 47-63.
- Krähenbühl, R. 2004. Temperatur und Kluftwasser als Ursachen von Felssturz. **9**, 19-35, doi: 10.5169/seals-224989.
- Leith, K., Moore, J.R., Amann, F. & Loew, S. 2014. In situ stress control on microcrack generation and macroscopic extensional fracture in exhuming bedrock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **119**, 594-615, doi: 10.1002/2012jb009801.
- Marmoni, G.M., Fiorucci, M., Grechi, G. & Martino, S. 2020. Modelling of thermo-mechanical effects in a rock quarry wall induced by near-surface temperature fluctuations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **134**, 104440, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104440>.
- Merrien-Soukatchoff, V. & Gasc-Barbier, M. 2020. Effect of thermal cycles on rocks outcrops. *XIII International Symposium on Landslides*, Carthagène, Colombia.
- Messenzehl, K. & Dikau, R. 2017. Structural and thermal controls of rockfall frequency and magnitude within rockwall-talus systems (Swiss Alps). *Earth Surface Processes and Landforms*, **42**, 1963-1981, doi: 10.1002/esp.4155.
- Molaro, J.L. & McKay, C.P. 2010. Processes controlling rapid temperature variations on rock surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, **35**, 501-507.
- Mufundirwa, A., Fujii, Y., Kodama, N. & Kodama, J.-i. 2011. Analysis of natural rock slope deformations under temperature variation: A case from a cool temperate region in Japan. *Cold Regions Science and Technology*, **65**, 488-500, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.11.003>.
- Safanda, J. 1999. Ground surface temperature as a function of slope angle and slope orientation and its effect on the subsurface temperature field. *Tectonophysics*, **306**, 367-375.
- Stock, G.M., Martel, S.J., Collins, B.D. & Harp, E.L. 2012. Progressive failure of sheeted rock slopes: the 2009–2010 Rhombus Wall rock falls in Yosemite Valley, California, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, **37**, 546-561, doi: 10.1002/esp.3192.
- Tabbagh, A. 1985. A New Apparatus for Measuring Thermal Properties of Soils and Rock in Situ. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **GE-23**, 896-900, doi: 10.1109/TGRS.1985.289475.
- Taboada, A., Ginouvez, H., Renouf, M. & Azemard, P. 2017. Landsliding generated by thermomechanical interactions between rock columns and wedging blocks: Study case from the Larzac Plateau (Southern France). *EPJ Web of Conferences*, **140**, 14012, doi: 10.1051/epjconf/201714014012.
- Vargas, E.d.A.J., Castro, J.T., Amaral, C. & Figueiredo, R.P. 2004. On mechanisms for failure of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil: Thermal fatigue? *In: Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B. & Sayao, A.S.F. (eds.) Landslides: evaluation and stabilization, Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides*. Taylor & Francis Group, Rio de Janeiro, 1007-1011.
- Vargas, E.d.A.J., Chavez, E., Gusmão, L. & Amaral, C. 2009. Is thermal fatigue a possible mechanism for failures of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil? *43rd U.S. Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*, Asheville, NC.
- Vlcko, J., Greif, V., Grof, V., Jezny, M., Petro, L. & Brcek, M. 2009. Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia. *Environmental Geology*, **58**, 1727-1740.
- Watson, A.D., Moore, D.P. & Stewart, T.W. 2004. Temperature influence on rock slope movements at Checkerboard Creek. *In: W., L., M, E., S.A.B, F. & A.S.F, S. (eds.) Landslides: evaluation and stabilization, Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides*. Taylor & Francis Group, Rio de Janeiro, 557-563.