



HAL
open science

Effet de cycles thermiques sur un massif rocheux : observations et mesures au laboratoire et in situ

Muriel Gasc-Barbier, Véronique Merrien-Soukatchoff, Claudia Villarraga-Diaz

► To cite this version:

Muriel Gasc-Barbier, Véronique Merrien-Soukatchoff, Claudia Villarraga-Diaz. Effet de cycles thermiques sur un massif rocheux : observations et mesures au laboratoire et in situ. *Revue française de Géotechnique*, 2020, 163, pp.4. 10.1051/geotech/2020013 . hal-03186054

HAL Id: hal-03186054

<https://hal.science/hal-03186054>

Submitted on 2 Jan 2023

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.

Effet de cycles thermiques sur un massif rocheux : observations et mesures au laboratoire et *in situ*

Effect of thermal cycles on a rock mass: Laboratory and *in situ* observations and measurements

Muriel Gasc-Barbier¹, V. Merrien-Soukatchoff², C. Villarraga-Diaz³

¹Cerema Méditerranée, Aix en Provence cedex 3, France

* corresponding author: muriel.gasc@cerema.fr

²GeF, EPN01, Cnam, Paris, France

³Cerema Sud-ouest, Toulouse, France *and* Department of Civil and Environmental Engineering, UPC, Barcelona, Espagne

Résumé :

Les instabilités rocheuses peuvent devenir des aléas majeurs. Plus encore que les températures extrêmes qui peuvent être atteintes, les variations cycliques de température augmentent les risques d'instabilité notamment sur les faces rocheuses soumises à des variations quotidiennes importantes d'ensoleillement. Le rôle des alternances gel/dégel a fait l'objet de nombreuses études, en revanche les aspects liés à la fatigue thermique et les phénomènes thermomécaniques se produisant au voisinage de la surface d'un massif rocheux (interface air-roche) sous l'effet des variations cycliques de température dues aux conditions climatiques naturelles le sont beaucoup moins. Le travail présenté ici synthétise 5 années de travail sur le sujet, menées en partie dans l'axe aléa du projet C2ROP.

Abstract:

Rock instabilities may represent a major hazard. More than the extreme temperatures that can be reached, the cyclic temperature variations increase the risk of instability especially on rock faces subject to daily important sunshine variations. The aspects of thermal fatigue and thermomechanical phenomena occurring near the surface of a rock mass (air-rock interface) - as a result of cyclical variations of temperature due to natural climatic conditions - are little documented. Our work synthetize 5 years development related to C2ROP hazard axis.

5 mots clés en français et en anglais pour le référencement

Introduction

L'influence de cycles thermiques de faible amplitude, mais répétés, est un phénomène qui a été peu étudié dans les roches, alors qu'il est relativement bien caractérisé dans d'autres types de matériaux. Dans les roches, les phénomènes thermiques et leur impact sur le comportement mécanique ont été analysés du point de vue microstructural, et il est maintenant bien connu qu'une élévation de température produit une dilatation des cristaux. Cette dilatation peut conduire à développer des contraintes intergranulaires de traction et de compression et, si celles-ci dépassent la résistance à la rupture, des fissures intergranulaires et intra granulaires peuvent se produire (Arnould et al., 2004 ; Gasc-Barbier et al., 2017). En revanche, la répétition cyclique d'une variation de température (considérée comme de la fatigue), plus faible que celle pouvant conduire à cette rupture inter ou intragranulaire est un phénomène qui a été peu étudié expérimentalement et peu quantifié. La fatigue, dans les roches, est généralement étudiée en chargement purement mécanique pour des fréquences comprises entre 0,1 et 10 Hz, parfois 100 Hz et ce, que ce soit dans les publications anciennes ou récentes (parmi d'autres : Saint-Leu et Sirieys, 1971 ; Attewell et Farmer, 1973; Bagde et Petroš, 2005, 2009). Les sollicitations thermiques des surfaces rocheuses auxquelles nous nous intéressons sont journalières (fréquences de l'ordre de 10^{-5}) ou saisonnières. Il n'existait pas d'expérience référencée de sollicitations thermiques positives à faible fréquence quand nous avons débuté les essais au laboratoire qui seront décrits ci-dessous.

Le rôle des cycles thermiques journaliers et saisonniers a été principalement étudié en géomorphologie, en particulier dans le cadre de l'analyse des évolutions du climat passé pour expliquer les formes actuelles des reliefs. Ces quelques études sont, par ailleurs, essentiellement qualitatives et non quantitatives. Le Ber & Oter Duthoit (1987) ont proposé une approche thermique et thermodynamique pour l'analyse de la désagrégation des parois rocheuses. Cette analyse est dédiée à l'étude des paléoclimats, et a été réalisée afin de mieux comprendre la formation des dépôts de pente, afin de proposer des modèles de transfert permettant de reconstituer les conditions climatiques contemporaines à leur mise en place. La dégradation de la paroi n'apparaît qu'au bout de plusieurs cycles, il s'agit donc d'une dégradation progressive et irréversible de la roche aboutissant à une augmentation du « désordre ». Si l'on se place d'un point de vue système macroscopique, cette évolution irréversible est quantifiée par la création interne d'entropie.

Plus récemment Hall (Hall (1999, 2011), Hall & Thorn, 2014) a été parmi les premiers à mentionner l'importance des phénomènes de fatigue thermique dans la propagation des fissures, y compris dans les régions froides. Il a en particulier montré que, sans négliger le rôle du gel/dégel, dans les régions les plus arides le rôle des contraintes thermiques pouvait être prédominant dans la déstabilisation des massifs. Ses travaux publiés en 1999 portent sur des considérations essentiellement géomorphologiques, et s'appuient donc sur les enregistrements de température en surface et leurs variations en profondeur dans le massif, ainsi que les différences d'ensoleillement. Il ne fait pas d'interprétation mécanique de propagation de la fracturation.

L'idée que la fatigue thermique puisse être à l'origine d'instabilités rocheuses a également été discutée à partir de l'analyse de plusieurs sites brésiliens. Vargas et al. (2004) présentent une étude portant sur un certain nombre de ruptures dans des pentes rocheuses qui se sont produites sur une période de plusieurs années et plus particulièrement dans des carrières de pierres de la région de Rio de Janeiro. Ces ruptures ont eu majoritairement lieu pendant les périodes sèches, correspondant aux mois de juin, juillet et août. Le document présente ces différents événements et propose une discussion sur les mécanismes déclencheurs potentiels. L'idée soutenue par les auteurs est que les variations journalières de température, en particulier lors des mois d'hiver (secs) peuvent créer des contraintes thermiques induites d'une magnitude

suffisante pour permettre la propagation de fractures qui préexisteraient dans la masse. Une proposition de mécanisme de rupture est alors ébauchée.

Enfin, lors des travaux réalisés sur les rochers de Valabres dans le sud de la France (Clément 2008 ; Gunzburger et al. 2005, Merrien et al., 2007), les auteurs ont mis en évidence numériquement et phénoménologiquement la possibilité que les variations de température, bien que très légères, du fait de leur périodicité journalière, soient suffisantes pour être un facteur déclenchant des instabilités.

Si l'ensemble de ces études caractérisent essentiellement l'influence des cycles thermiques à partir de constatations menées sur le terrain, il n'y a pas eu d'étude approfondie en laboratoire pour caractériser précisément le phénomène. Dans le cadre du projet national C2ROP (2015-2019), et plus précisément au sein de l'axe A.2.1 « influence du climat sur les chutes de blocs » différents travaux ont été menés concernant l'étude du développement de la fracturation liée aux cycles thermiques. Le site d'étude, le toit instable d'une caverne située au-dessus du village de La Roque-Gageac, en Dordogne (figure 1) a été instrumenté et suivi par le Cerema Sud-Ouest (site de Toulouse) entre 2010 et 2016, période pendant laquelle des travaux de confortement de la poutre instable ont été réalisés. Des travaux expérimentaux ont été menés également au Cerema Sud-Ouest (site de Toulouse) en grande partie dans le cadre de la thèse de Claudia Villarraga-Diaz (2018). Les travaux réalisés *in situ* et au laboratoire ont été présentés dans différentes conférences, mais ce papier synthétise l'ensemble des expérimentations.



Figure 1 : Site de la Roque Gageac et localisation de la cavité dont le toit s'est en partie effondré en 2010

La Roque-Gageac village – location of the perched cavity

Identification *in situ* du phénomène

Le climat du département de la Dordogne est de type tempéré avec une influence dominante océanique. En hiver, le département peut aussi subir des influences montagnardes conséquence de la proximité du Massif central. À l'inverse, en été, le climat peut subir des apports d'air chaud en provenance de la Méditerranée. Les températures maximales annuelles sur le département sont comprises entre 27 C et 32 °et les températures minimales entre –10 C et –15 C.

Au niveau du site de la Roque Gageac, la Dordogne entaille la formation perméable des **calcaires gréseux du Coniacien** supérieur et moyen, qui forment les falaises surplombant le village. Le Périgord, calcaire, est affecté par de nombreux karst. Dans le cas de la falaise de la Roque Gageac, le réseau karstique est dit perché, car son développement vertical a été interrompu par une couche imperméable et il se trouve ainsi au-dessus de son exutoire naturel, la Dordogne. La cavité dans lequel est construit le fort troglodyte, que nous évoquerons ultérieurement, appartient à une partie inactive du réseau aussi appelé paléokarst. En effet, lors de la prospection, plusieurs conduits d'alimentation du réseau karstique ont pu être remontés à l'aplomb du fort ; la totalité d'entre eux était, à divers niveaux, obstruée par des remplissages sablo-argileux riches en oxydes de fer. En revanche, il existe aussi une partie active dans les calcaires gréseux du Coniacien avec, comme indicateur, les sources qui jaillissent en pied de falaise sur la commune de la Roque Gageac. Ces réseaux, actifs ou inactifs, affaiblissent considérablement la structure du rocher et font partie des facteurs aggravants dans la stabilité d'ensemble de la falaise.

Le village de la Roque-Gageac ainsi que la Dordogne reposent sur la partie inférieure et marneuse des calcaires de l'étage du Coniacien (figure 2). Cette lithologie est propice à la création de replats dans le paysage. La falaise, quant à elle, est constituée de la partie moyenne et supérieure à dominante gréseuse des calcaires de l'étage du Coniacien. Les calcaires gréseux du Coniacien d'une hauteur moyenne de 60 à 80 m peuvent se diviser, à l'échelle régionale, en trois ensembles :

- à la base : un banc dur de 25 m de calcaire gréseux micritique et bioclastique à débris de Bryozoaire ;
- au milieu : un banc tendre de 6 à 10 m ;
- en tête : un banc dur de 45 m montrant des faisceaux de stratification oblique et entrecroisée

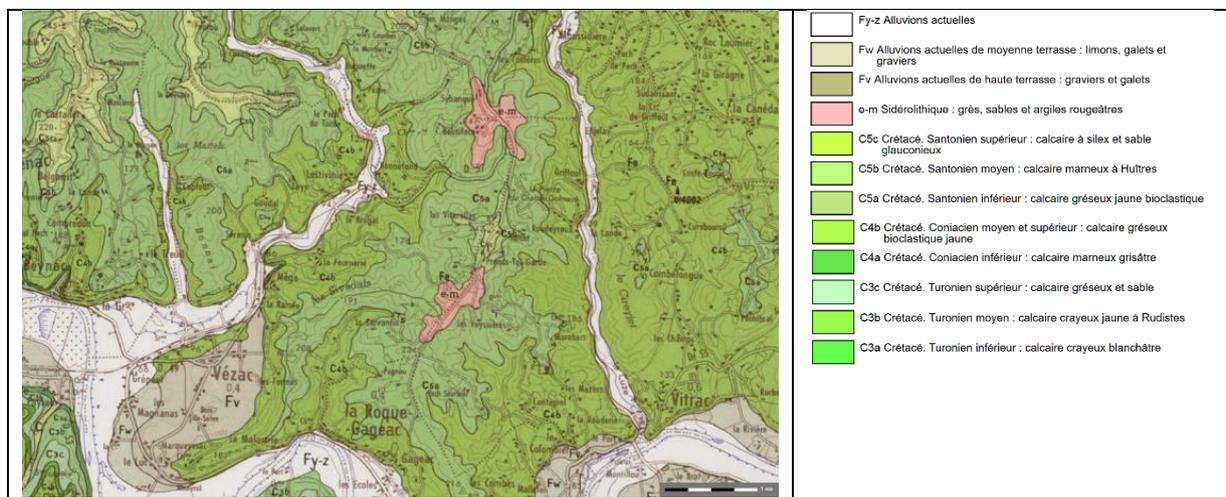


Figure 2 – Extrait de la carte géologique (1/50 000) de Sarlat-La-Canéda (BRGM). Échelle effective donnée par la barre en bas à droite
Extract of the geological map (1/50 000) - BRGM) the scale can be seen on the black and white line

Historique des éboulements sur le site

Au moins quatre éboulements ont été référencés au niveau du village de La Roque-Gageac depuis 1920. Les trois d'entre eux qui ont pu être localisés sont reportés sur la figure 3. L'éboulement de 1920 correspond à un l'effondrement d'un pan à l'est du village. En 1957, l'effondrement d'un pan complet à l'ouest, dont le volume exact n'a pu être défini, a causé la mort de trois personnes. L'effondrement de 1994, au centre de la falaise, n'a pu être localisé précisément. Enfin, celui de 2010, qui nous a conduits à nous intéresser au site, correspond à l'effondrement d'une partie du toit d'une cavité perchée, transformée au moyen-âge en fort troglodyte.



Figure 3 – Localisation des ruptures recensées
Location and date of identified rockfalls

Instrumentation mise en place sur le site

Afin de suivre l'évolution du toit du fort troglodyte, instable, en attendant des travaux de confortation, il a été procédé à la mise en place d'une instrumentation. La figure 4a montre une coupe schématique de la falaise, la figure 4b une photo de face de la zone indiquant plus précisément l'instrumentation mise en place décrite dans Gasc-Barbier et al. (2015). Elle est composée principalement de quatre fissuromètres et de deux extensomètres de forage à plusieurs points de mesure.

Il n'a pas été possible de disposer d'une station météo complète sur le site, en revanche un capteur de température « pendant » a été installé au toit de la cavité, à l'intérieur de celle-ci, proche des fissuromètres 2, 3, 4. Cette sonde température a permis de mesurer la température dans la cavité toutes les heures. Enfin, des visites régulières sur le site ont montré que les écoulements d'eau y étaient essentiellement superficiels.

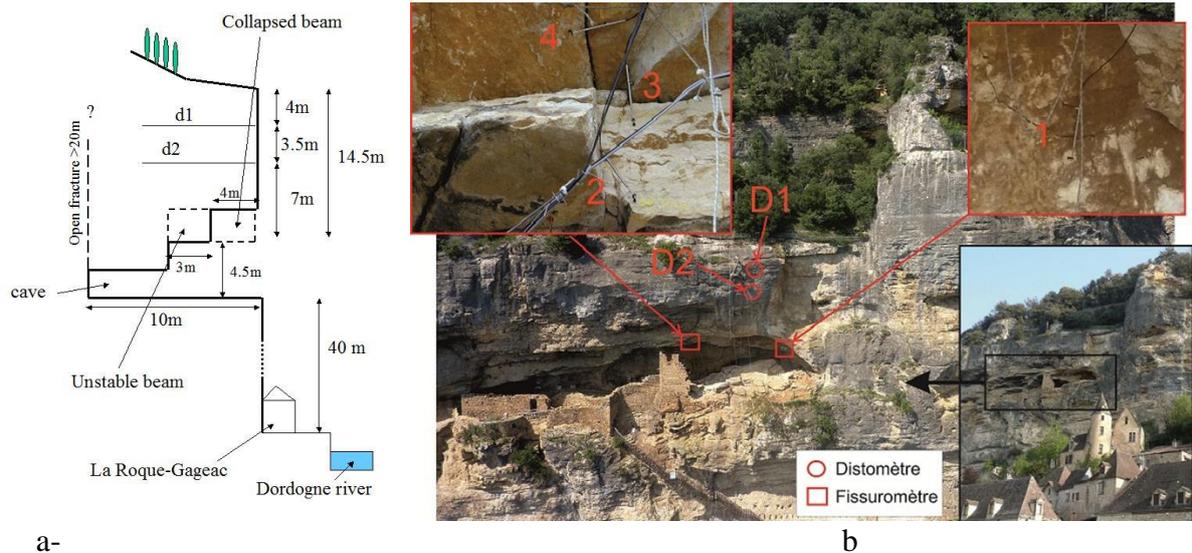


Figure 4 : Localisation de l'instrumentation mise en place sur le site. a- schéma, vue en coupe, b- vue de face

Instrumentation set up located on the site. a- sectional view, b- front view

Caractéristiques des fissuromètres

Les fissuromètres sont des extensomètres simples qui mesurent donc des déplacements entre leurs deux points extrêmes. Les quatre fissuromètres ont été placés de part et d'autre de plusieurs fissures jugées problématiques afin de quantifier l'ouverture ou la fermeture de celles-ci, c'est-à-dire d'évaluer les mouvements des blocs rocheux les uns par rapport aux autres, en fonction des variations des conditions extérieures. Une valeur est enregistrée toutes les heures. F1 est seul, à l'Ouest de la poutre et permet de suivre l'évolution d'une petite fissure du côté où la poutre est la plus encastrée dans le massif. Les 3 autres fissuromètres sont positionnés à l'extrémité est, là où la poutre semble plutôt en appui simple. Ils doivent permettre d'anticiper un éventuel déplacement de la poutre.

Caractéristiques des extensomètres de forage

Les extensomètres de forage utilisés sont des distofors de marque RockTest / Télémac, ancrés en fond de forage. Ces extensomètres ont été préparés avec trois points de mesure à 2, 4 et 6 m de l'ouverture. Des capteurs de température sont positionnés à chacun de ces points de mesure ainsi, on peut suivre l'évolution de la température en fonction de la profondeur du massif. Ces températures ne sont cependant probablement qu'indicatives de l'évolution de température dans la roche elle-même, car l'isolation parfaite du forage n'est pas assurée. La résolution en déplacement donné par le fournisseur est inférieure à 0.01 mm. Compte tenu de la longueur des cannes utilisées (12 m), la précision est de l'ordre de 0.05 mm. La température d'utilisation doit rester entre 0 et 50°C. Les extensomètres ont été placés, perpendiculairement à la paroi rocheuse, à environ 5 m et 7,5 m au-dessus du toit de la cavité troglodyte, afin d'obtenir des paramètres au cœur du massif. Ils permettent des enregistrements quasiment continus, mais compte tenu de la durée de l'étude, nous avons fait le choix de programmer un enregistrement toutes les heures.

Enregistrements bruts des fissuromètres et de la sonde de température

La figure 5 présente les valeurs brutes des quatre fissuromètres ainsi que la température enregistrée entre juillet 2010 et mai 2014. Globalement, les quatre fissuromètres répondent de la même façon, même si leur amplitude de déplacement diffère. En effet, on observe une

amplitude totale de déplacement de 0,4 mm, pour le fissuromètre 1 contre environ 3,5 mm pour les fissuromètres 3 et 4. Grâce à la durée de l'enregistrement, on peut observer la « respiration » des fissures. Les enregistrements ayant débutés en juillet, on observe globalement une ouverture des fissures (pente des déplacements positive) au printemps et en été, et une fermeture des fissures (pente des déplacements négative) dès que les températures tendent à diminuer, à l'automne. L'hiver semble correspondre à une stagnation des déplacements.

La sonde de température montre que la variation horaire des températures est souvent inférieure au degré. Ponctuellement des variations horaires beaucoup plus importantes ont pu être mesurées : +12,4° le 06/04/2011 entre 12 et 13h et -9,5°C le 14/12/2012 entre 17 et 18h. La température maximale enregistrée sur le site a été de 47,4° le 09/09/2001 (à 16h). Des températures négatives ont ponctuellement été enregistrées les deux premiers hivers, une température minimale de -6,5°C a été enregistrée le 09/02/2012 à 9:00. Les variations minimales et maximales (pour 1 h) sont -7°C/h le 05/10/2012 entre 18:00 et 19:00 et +12,5°C/h le 06/04/2011 entre 12:00 et 13:00.

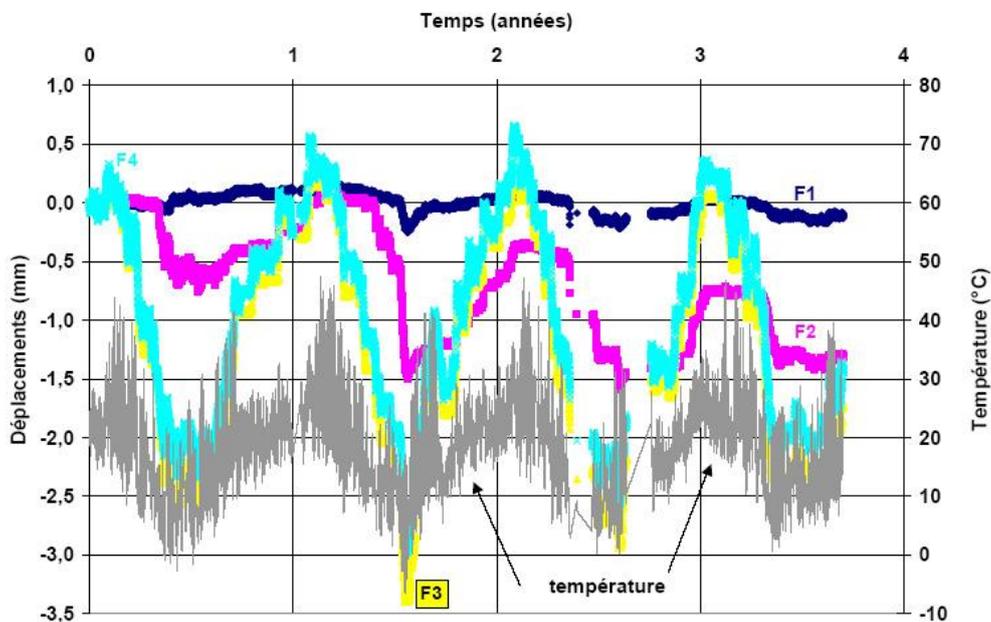


Figure 5 – Enregistrement des fissuromètres entre le 10 juillet 2010 et le 04 avril 2014 – la température est prise à la sonde dans la cavité.

Fissurometers recording between 2010-07-10 and 2014-04-04 – temperature came from the probe in the cavity

Enregistrements bruts des extensomètres de forage

Les deux extensomètres de forage positionnés perpendiculairement à la paroi, vers le cœur du massif (figure 4), sont équipés de trois points de mesures chacun, à 2, 4 et 6 m de la paroi. En ces points de mesure, les déplacements et la température sont enregistrés. La figure 6 présente les données acquises en fonction du temps pour l'extensomètre de forage 2. Concernant le déplacement, il s'agit du déplacement entre le fond du forage et le point considéré, un déplacement positif signifie que le point s'éloigne du fond du forage. Seules les courbes de D2 sont présentées sur la figure 6, mais les similitudes et les différences entre D1 et D2 sont décrites ci-dessous :

- les déplacements et la température diminuent avec la profondeur ;

- la variation de température est systématiquement inversement corrélée aux déplacements ;
- les déplacements enregistrés à 6 m de profondeur ont des amplitudes très similaires (de l'ordre de 0,1 mm) ;
- l'amplitude maximum (de l'ordre de 1,75 mm) est obtenue pour l'extensomètre 1 à 2 m de profondeur ;
- on observe pour l'extensomètre D2 que les déplacements sont d'autant plus importants qu'on se rapproche de la paroi (plus le point est éloigné du fond du forage, plus il se déplace). En revanche, ce n'est pas le cas pour D1 qui présente des courbes de déplacements à 2 et à 4 m quasiment superposables ;
- si l'on regarde de près l'évolution des déplacements sur quatre ans, on observe une légère augmentation globale des déplacements au cours du temps. Ceci est également visible sur la courbe déplacement en fonction de la température (figure 8, paragraphe suivant).

Le comportement de D1 laisse penser que les points les plus superficiels appartiennent à un même bloc "rigide" séparé du reste du massif plus profond par une fracture, qui « désolidariserait » ce bloc du massif.

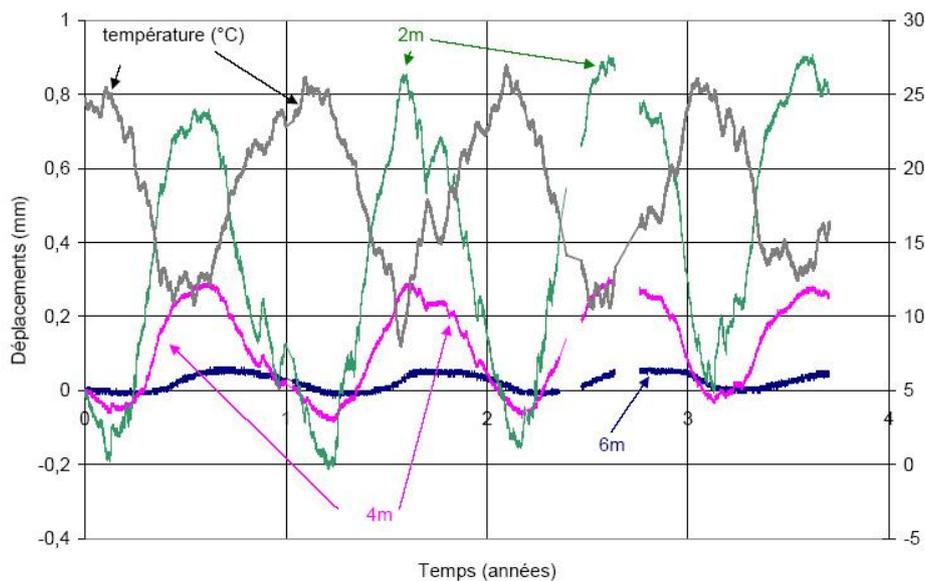
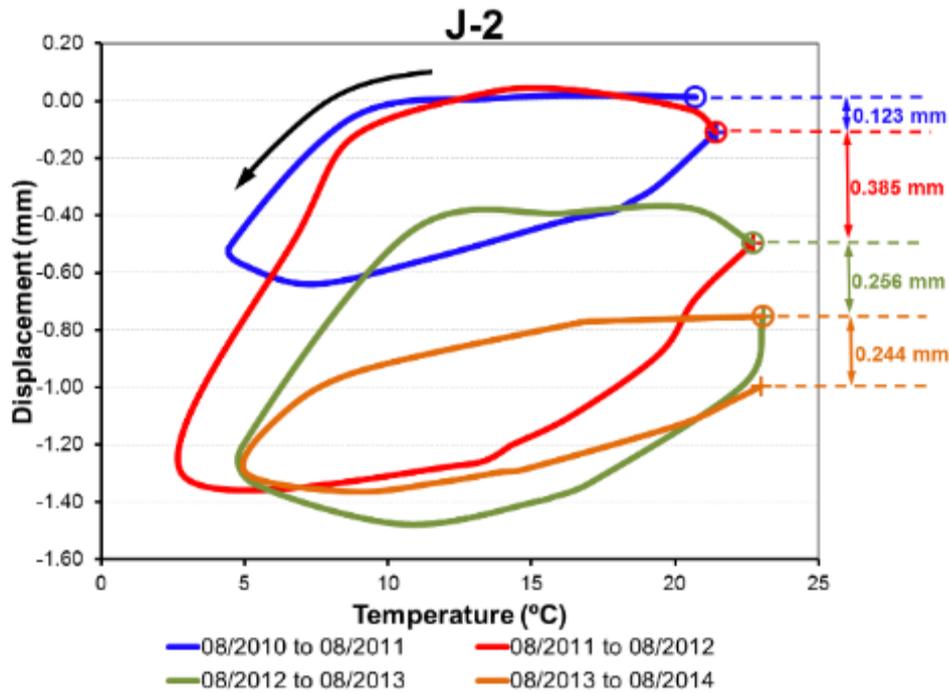


Figure 6 – Extensomètre D2 entre le 10 juillet 2010 et le 04 avril 2014 et température enregistrée dans D2 à 2m de profondeur

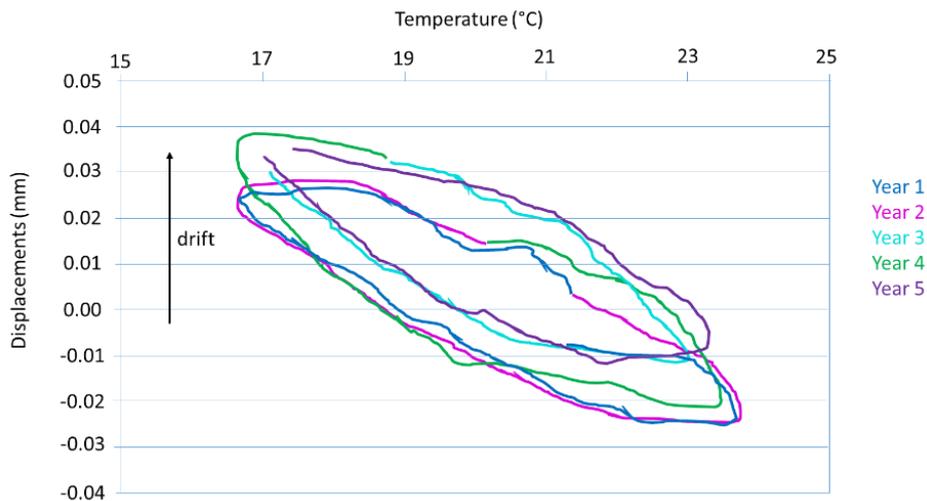
D2 recorded between 2010-07-10 and 2014-04-04- temperature is recorded and 2m depth

Corrélation déplacements / température

La figure 7a présente la corrélation entre les déplacements et la température obtenue sur le fissuromètre F2 (Villarraga-Diaz, 2018) et la figure 7b une corrélation similaire sur D1 à 6 m de profondeur. Sur ces figures, on observe un décalage des déplacements qui va dans le sens d'une augmentation générale. Cette augmentation, certes faible, laisse penser que l'accumulation des cycles de température produit un phénomène cumulatif significatif d'une fatigue du massif rocheux.



a



b

Figure 7 : Déplacements en fonction de la température
a - fissuromètre 2 (Villarraga et al., 2018) ; b- enregistrés à 6 m de profondeur sur D2
Displacements as a function of temperature
a- F2 (Villarraga et al., 2018) ; b- 6 m depth in D2

Conclusion sur les observations terrain

Les enregistrements de déplacements et de température se sont déroulés sur une période de 5 ans, de l'été 2010 jusqu'à l'été 2015 lorsque des travaux de confortement ont été réalisés pour stabiliser la poutre qui menaçait de tomber. La fréquence d'enregistrement élevée (toutes les heures, sauf pendant de courtes périodes de dysfonctionnement) a permis d'acquérir et de traiter une masse très importante de données qui a permis, en particulier :

- L'estimation des propriétés de transfert thermique *in situ*, à l'aide de la corrélation entre les déformations et la température à différentes profondeurs, grâce aux extensomètres de forage ; la diffusivité thermique *in situ* a pu être ainsi estimée à $5.20 \pm 2.38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

¹, à partir d'une rétroanalyse des données sur la base d'un modèle semi-infini. Cette valeur est cependant discutable, car d'une part l'isolation du forage n'était pas sans doute pas parfaite (elle n'a pas été vérifiée), d'autre part l'estimation repose sur l'hypothèse d'un milieu semi-infini alors que la topographie de la zone où est installée les extensomètres est plus complexe ;

- une analyse du comportement thermoélastique global du site (Ruiz 2012) grâce à une modélisation 3D du site en se basant sur la première année d'enregistrement des fissuromètres qui représente la « respiration » du massif (évolution des déformations en fonction de la température)
- l'analyse de l'évolution des ouvertures de fissures (grâce aux fissuromètres) mais aussi des déformations au cœur du massif (grâce aux extensomètres de forage) en fonction des cycles de température annuels. Une partie de ces déformations étant irréversibles ; l'hypothèse de milieu élastique continu évoquée au-dessus ne permet pas de rendre compte du comportement du massif.

Cette dernière observation a conduit à proposer une série de développements expérimentaux.

Développements expérimentaux

Afin de mieux comprendre les phénomènes observés *in situ*, nous avons mené une série d'expérimentations en laboratoire permettant de mieux qualifier et quantifier l'influence de la répétitions de cycles thermiques positifs mais d'amplitude peu élevée sur le comportement des roches.

Propriétés physiques du matériau et dimensionnement du plan d'expérience

Pour mener à bien l'étude d'ingénierie nécessaire à la mise en sécurité du site, le Cerema Toulouse a réalisé une caractérisation relativement exhaustive des propriétés physiques du calcaire de La Roque-Gageac. On retiendra les valeurs suivantes :

- densité $\rho=2382 \text{ kg/m}^3$;
- V_p moyen = 4651m/s écart type:545 ;
- V_s moyen:2671m/s écart-type:171 ;
- porosité totale $n_t=17 \%$;
- porosité connectée $n_c=11,2 \%$;
- teneur en eau $w=4,7 \%$;
- diffusivité thermique : $5.20 \pm 2.38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (estimée par les enregistrements *in situ*).

Coefficient de dilatation thermique

Pour l'étude des pierres naturelles, l'essai de mesure du coefficient de dilatation thermique (linéaire) est normalisé, sous le n° EN 14-581 « méthodes d'essais pour pierres naturelles – Détermination du coefficient linéaire de dilatation thermique ». La figure 08 présente les cubes de calcaire de La Roque-Gageac préparés au laboratoire et un schéma du système de jauges mises en place pour la mesure du coefficient de dilatation thermique.

Cette mesure nous a permis d'obtenir : $\alpha = 6 (\pm 3) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$

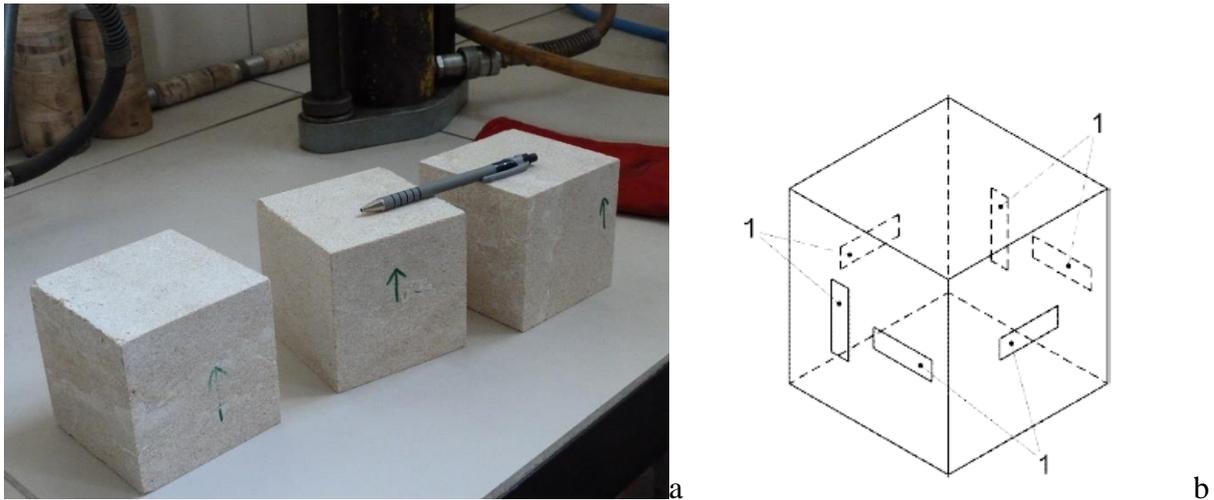


Figure 8 : Mesure du coefficient de dilatation thermique a- éprouvettes d'essai, b- schéma de montage des jauges

Coefficient of thermal expansion measurement a- test specimens, b- assembly diagram of gauges

Programme expérimental

À l'échelle microscopique, les minéraux constitutifs des roches réagissent différemment aux variations de température en matière de dilatation thermique, de microfissuration se développant ensuite en macrofissuration. Par ailleurs si les déformations et les contraintes thermiques sont suffisantes, ces dernières peuvent conduire à la génération et à la propagation de microfissures. Cette évolution peut être suivie macroscopiquement par l'enregistrement de la vitesse des ondes élastiques. Ce type de mesure non destructive peut permettre de suivre l'endommagement de la roche. L'enregistrement des ondes P et S après la répétition d'un certain nombre de cycles a donc été privilégié pour suivre l'impact de ces cycles.

Le nombre de cycles par jour a été fixé en tenant compte de la valeur de diffusivité thermique estimée à partir des données terrain qui permettent de trouver le bon couple (longueur caractéristique ; vitesse de chargement thermique) en fonction de la taille des éprouvettes.

Une série de 34 essais a été réalisée dans le cadre de la thèse de Claudia Villarraga-Diaz (Villarraga-Diaz, 2018 ; Villarraga-Diaz et al., 2018), qui faisait suite à 4 essais de faisabilité (Gasc-Barbier et al. 2014). Dans l'objectif de reproduire les variations journalières naturelles de température auxquelles sont soumises les faces ensoleillées du massif, tout en accélérant la vitesse des cycles pour réduire le temps d'essai, les éprouvettes ont été soumises à 6 ou 7 cycles thermiques par 24 heures. Les températures varient entre 10° C et 50°C, cette dernière valeur étant légèrement supérieure à celle enregistrée *in situ* (47° max).

Sur les 34 éprouvettes, en plus des enregistrements réguliers des vitesses des ondes élastiques, des mesures de résistance à la compression simple après un certain nombre de cycles et quelques mesures de propagation de fissures par analyse d'image. Le tableau 1 présente la synthèse des essais réalisés. L'enceinte climatique à notre disposition ne permet pas la réalisation d'essais mécaniques en son sein. Ainsi, une pause quotidienne de 3 heures est aménagée dans l'application des cycles thermiques, afin de sortir les éprouvettes de l'enceinte pour effectuer soit les mesures de vitesses des ondes élastiques, soit les photos nécessaires à l'analyse d'image. Seules les déformations sont mesurées en continu (dans et hors enceinte climatique) à l'aide de jauges extensométriques collées (les mesures sont corrigées des effets thermiques).

Tableau 1 : Synthèse des essais réalisés

Synthetic view of the tests carried out

Les éprouvettes B proviennent d'un bloc, les éprouvettes D d'un second bloc et les éprouvettes CH et CV ont été carottés *in situ* respectivement horizontalement et verticalement

épreuve	Nombre de cycles thermiques	Mesure des déformations	Vp-Vs	Résistance à la compression simple	Corrélation d'image
B1	948	X			
B2	948	X	X		
B3	948	X	X		
B4	Mesure de la température à l'intérieur de l'échantillon				
B5	828		X	X	
B6	828		X	X	
B7	828		X	X	
B8	624			X	
B9	624			X	
B10	624			X	
B11	420			X	
B12	420			X	
B13	420			X	
B14	210			X	
B15	210			X	
B16	210			X	
B17	0			X	
B18	0			X	
B19	0			X	
B20	396				X
CV1	910	X	X		
CV2	1222		X		
CV3	1222		X		
CV4	910	X	X		
CV5	1222		X		
CH1	1222		X		
CH2	910	X	X		
CH3	1222		X		
CH4	1222		X		
CH5	910	X	X		
D1	948				X
D2	948				X
D3	948				X
D4	1080				X

Évolution des déformations avec le nombre de cycles

La figure 9 présente deux cas typiques d'évolution a- des déformations axiales et radiales en fonction du temps sur une éprouvette et b- des vitesses des ondes de compression au cours du

temps, mesurées sur 3 éprouvettes. L'ensemble des résultats expérimentaux donnent ce même type de comportement : on observe une diminution des déformations axiales et radiales qui correspond à une extension, donc à une augmentation de volume, et, en parallèle, on observe une diminution de la vitesse des ondes de compression. Cette diminution est caractéristique du développement de microfissuration à l'intérieur de l'éprouvette. La seule sollicitation à laquelle les éprouvettes sont soumises étant la sollicitation thermique, on en déduit que c'est bien celle-ci qui conduit à la création de microfissuration.

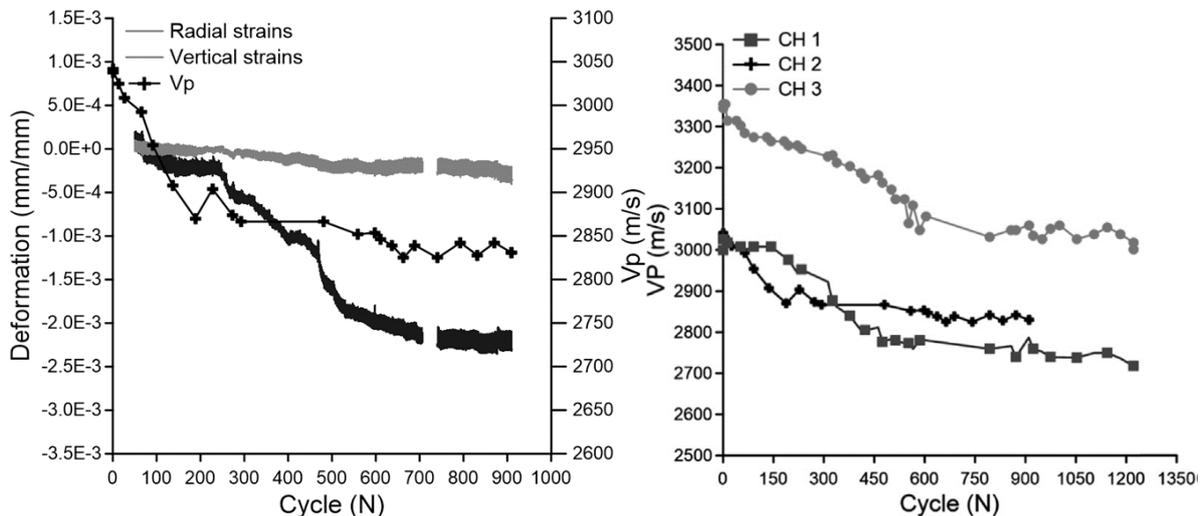


Figure 9 : Résultats typiques d'essais a- évolution des déformations radiale et axiale et de la vitesse des ondes P en fonction du nombre de cycles thermiques, b- Comparaison des vitesses des ondes P mesurées sur 3 échantillons différents.

Typical results obtained on samples a- evolution of radial, vertical strain and Vp with the number of thermal cycles obtain on a sample, b- comparison of VP measured on 3 samples (please remember that extension is negative)

Pour comparer la réponse en déformation de l'éprouvette à différents degrés de sollicitation thermique (nombre de cycles), nous avons choisi 3 dates éloignées (jour 10, 30 et 80), à raison de 7 cycles thermiques par jour. Sur la figure 10, les déformations ont été remises à 0 à chaque début du jour considéré pour permettre une comparaison. On observe ainsi que l'amplitude des déformations cycliques diminue avec le nombre de cycles auxquels l'éprouvette est soumise. De plus, il semble que l'éprouvette ait un délai de réponse de plus en plus long à la sollicitation thermique, lorsque le nombre de cycles augmente : un léger décalage est visible (Figure 10).

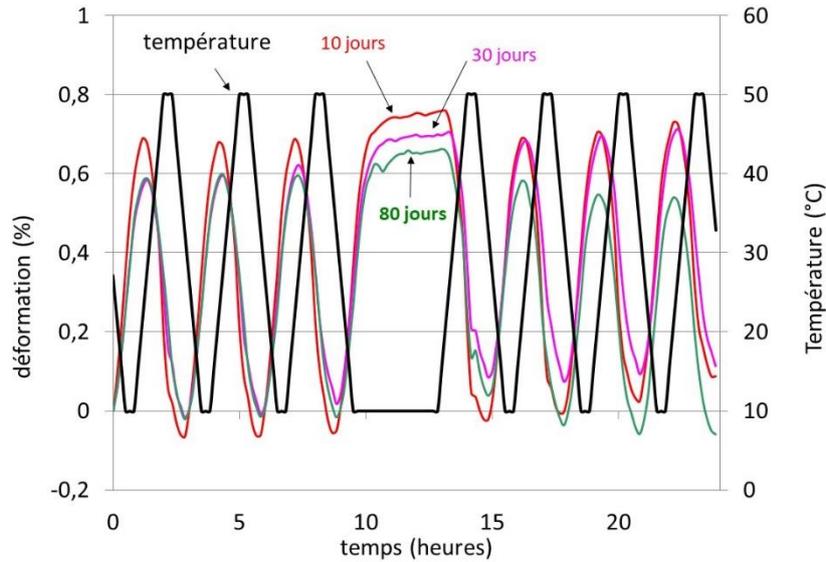


Figure 10 : Déformations horizontales à différentes dates- échantillon 3
Comparison of horizontal strain at 3 dates – sample 3

Les figures 11a et 11b illustrent aussi l'évolution des déformations (respectivement verticales et radiales) en fonction de la température pour plusieurs cycles distants (Villarraga et al. 2018). On observe l'augmentation des déformations avec le nombre de cycles. On peut également noter, en particulier pour les déformations horizontales (figure 11a) un certain écrasement de l'hystérésis de déformation entre la charge et la décharge thermique. Cette fermeture de l'hystérésis est observée sur une partie des éprouvettes, mais n'est pas systématique.

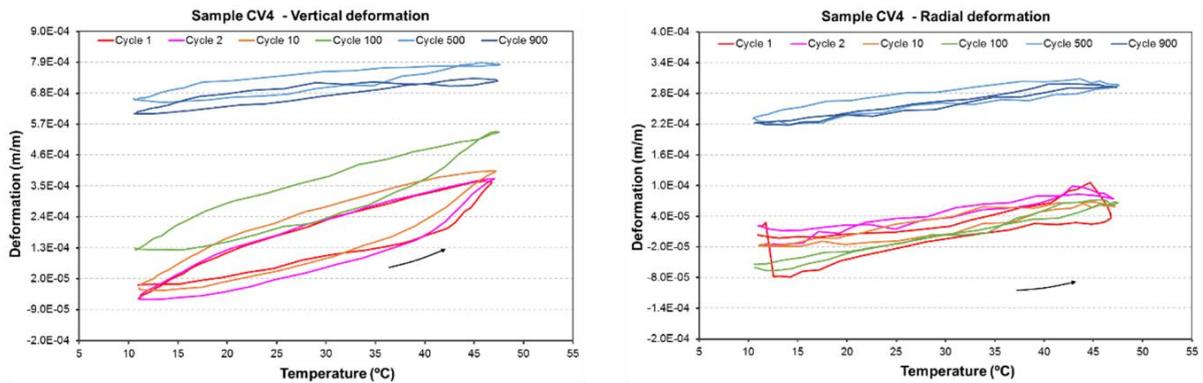


Figure 11 : Comparaison des déformations verticales et radiales pour différents cycles thermiques – éprouvette CV4
Comparison of a-vertical, b- radial deformation after different values of thermal cycles

Évolution de la résistance à la compression simple

Afin d'analyser l'influence des cycles thermiques sur la valeur de la résistance à la compression simple de la roche, des essais de compression ont été réalisés sur des séries de 3 éprouvettes (pour avoir une information sur la dispersion des résultats) soumises à 210, 420, 624, ou 828 cycles (cf. tableau 1). Toutes les éprouvettes sont issues du même bloc initial (B) pour garder une homogénéité relative. La figure 12 reprend les courbes contraintes-déformation obtenues

sur 5 éprouvettes, une par chargement thermique testé. Comme il y avait 3 essais à chaque fois, c'est la courbe intermédiaire qui a été représentée sur la figure.

On observe que la résistance à la compression simple diminue lorsque le chargement thermique (i.e. le nombre de cycles) augmente, ce qui est cohérent avec les mesures de vitesses des ondes élastiques. La répétition de cycles thermiques diminue donc les caractéristiques mécaniques de la roche mesurées, ce qui est attesté d'une part par la vitesse des ondes de compression et d'autre part par la résistance à la compression simple.

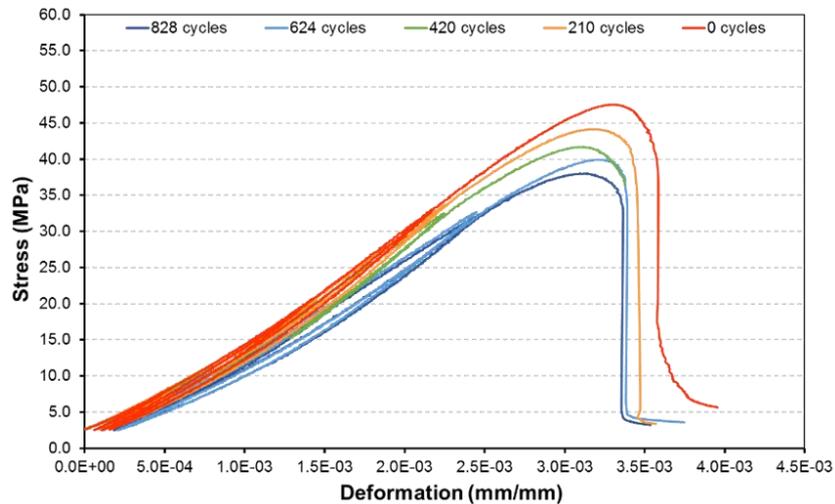


Figure 12 : Courbes de contrainte-déformation obtenues sur des éprouvettes ayant été soumises à 0, 210, 420, 624 and 828 cycles thermiques
Strain-stress curves obtained on samples submitted to 0, 210, 420, 624 and 828 thermal cycles

La figure 13, présente, en fonction du nombre de cycles thermiques appliqués, la diminution de résistance à la compression simple (pour les 3 éprouvettes testées) et de la vitesse des ondes de compression dans les éprouvettes avant essai mécanique. Sur cette figure, les valeurs pour les 3 essais réalisés à chaque nombre de cycles fixes, sont reportées. La diminution est indéniable, mais on observe également une forte dispersion des résultats. Il aurait sans doute été utile de multiplier les essais pour mieux caractériser le phénomène.

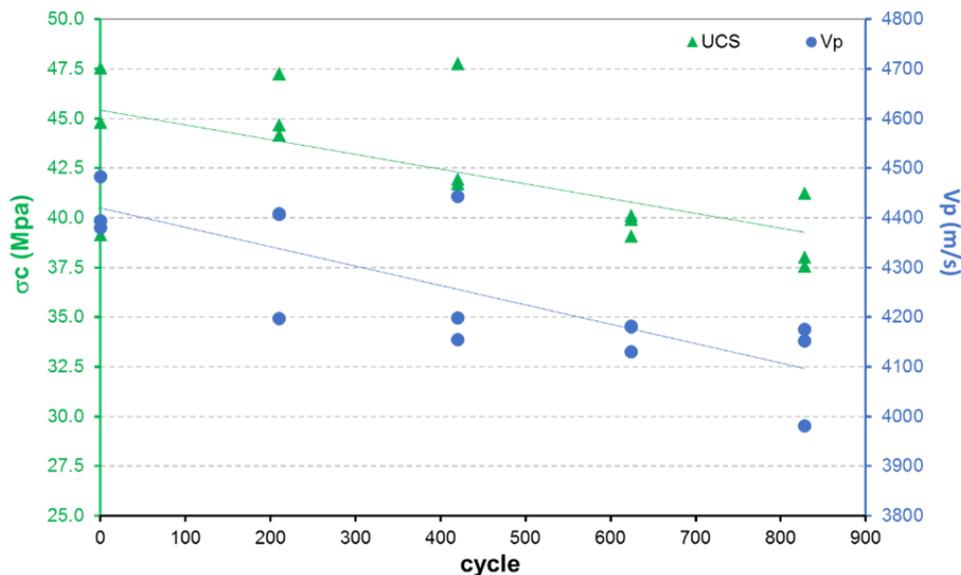


Figure 13 : Comparaison des résistances à la compression simple et vitesses des ondes de compression pour un nombre de cycles thermiques imposés différents
Evolution of UCS and Vp with the number of thermal cycles

Évolution de fissures préexistantes par analyse d'image

Comme indiqué dans le tableau 1, cinq éprouvettes ont été suivies non pas par mesures physiques ou mécaniques, mais par analyse d'image. Les éprouvettes sélectionnées pour ce type d'analyse présentaient antérieurement à l'application des cycles thermiques une fissure a priori fermée, mais visible à l'œil nu (figure 14, image de référence à 0 cycle) ; sur certaines éprouvettes cette fissure était naturelle, sur d'autres, elle a été créée artificiellement par un choc (coup de marteau). La figure 14 présente le suivi mené sur l'éprouvette B20 (tableau 3). Les photos brutes sont positionnées sur la ligne du haut, avec en haut à gauche la photo prise comme référence, à partir de laquelle la corrélation d'image est effectuée. La ligne du bas présente les images traitées en termes de déformations verticales ϵ_{yy} . Les déformations horizontales ϵ_{xx} et les déformations de cisaillement ϵ_{xy} ont également été estimées par corrélation d'images, mais ces dernières ne sont pas reportées ici pour simplifier la figure.

Si l'on regarde les photos non traitées, on ne discerne pas à l'œil nu d'ouverture de la fissure préexistante. En revanche, sur les images interprétées on observe la création, entre autres, d'une bande bleue marquée, qui peut être interprétée, par l'ouverture de la fissure les déformations négatives correspondant à une extension.

On peut également noter que deux essais de corrélation d'image ont été réalisés sur des échantillons sur lesquels aucune fissure préexistante n'était visible, et, dans ce cas, nous n'avons pas pu visualiser de création de fissure.

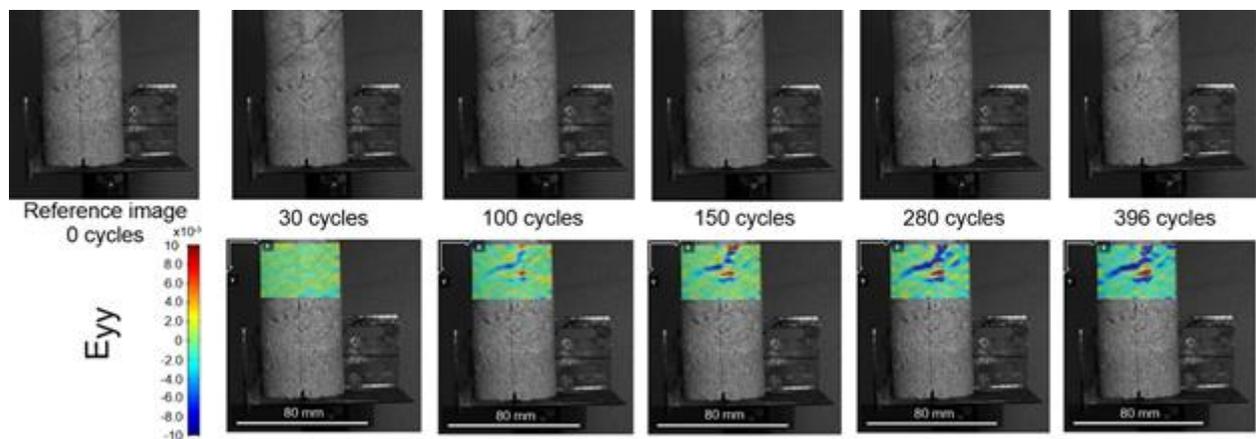


Figure 14 : Visualisation d'une ouverture de fissure avec l'augmentation du nombre de cycles thermiques
Visualization of a crack opening with increased number of thermal cycles

Conclusion sur les développements expérimentaux

Les différents essais présentés ici ont permis de montrer que la succession de cycles thermiques d'amplitude faible, mais répétés, conduit à un endommagement de la matrice rocheuse caractérisé par la diminution de la vitesse des ondes élastique et de la résistance à la compression simple. Par ailleurs, la création de nouvelles fissures n'a pas pu être mise en évidence sur deux éprouvettes sans fissure visible initiale suivies par corrélation d'image. Cela

tend à montrer que cet endommagement de la matrice semble être dû, plus à de l'ouverture de fissures préexistantes qu'à de la création de nouvelles fissures. Notons que de telles expériences sont longues et nécessitent un suivi régulier.

Discussion et développements théoriques

Comme on vient de le voir, les analyses en laboratoire ont donc permis d'observer que l'application de cycles thermiques de faible ampleur, mais répétés conduit à un endommagement de la matrice rocheuse. Cet endommagement pourrait être notamment expliqué par l'ouverture de fissures, identifiée grâce à la technique de corrélation d'image.

Les observations *in situ* ont permis, elles, d'enregistrer et de mesurer des déplacements qui ne peuvent être uniquement expliqués par le comportement thermo-élastique continu du massif (irréversibilité d'une partie des déformations). La chute d'une partie du toit de la cavité qui a entraîné la présente étude s'est produite en chute libre (toit quasiment horizontal). Le déplacement ayant conduit à la chute s'est donc produit dans la direction perpendiculaire au toit. Or, du fait de la présence de matière (matrice rocheuse), les déplacements sont empêchés dans cette direction. Il y a alors création de contraintes qui peuvent probablement atteindre la limite de contrainte à la rupture.

Les observations et mesures au laboratoire et *in situ* concourent donc à mettre en évidence des conséquences mécaniques aux variations de température, cependant les mécanismes précis de modification des caractéristiques mécaniques liées aux variations cycliques de température n'ont pas pu être complètement établis dans les expériences au laboratoire et *in situ*.

Des calculs analytiques ont montré qu'une variation de température de -15°C peut provoquer une variation de contrainte de $4,5^{\circ}\text{MPa}$. Si les contraintes initiales dans le massif sont faibles, une telle variation de contrainte peut conduire la roche à la rupture par traction. La mécanique de la rupture peut également permettre d'expliquer des ruptures pour de plus faibles variations de température.

Selon la mécanique de la rupture ; une fissure peut se propager selon 3 modes possibles, ou une combinaison de ces trois modes (Engerand, 1990). L'analyse du champ de contrainte élastique a conduit Irwin (1926), cité par Engerand, à la notion de facteur d'intensité de contrainte (K). Ce facteur K est exprimé en $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, est fonction de la géométrie du matériau fissuré, des dimensions de la fissure et du type de chargement. La capacité de la fissure à se propager est contrôlée par une valeur seuil du facteur K, appelé ténacité et notée K_c . Si K dépasse la valeur de la ténacité, la fissure peut se propager. Pour chacun des trois modes de rupture possible, il est possible de mesurer une ténacité, notée alors K_{Ic} , K_{IIc} and K_{IIIc}). La société internationale de mécanique des roches recommande certaines configurations spécifiques pour la mesure des ténacités, suivant le mode de rupture étudié (ISRM, 2015).

Pour une fissure de longueur $2a$, soumise à un champ de contraintes principales (σ_1, σ_2) dans un milieu semi-infini, on peut calculer l'incrément de température nécessaire pour propager une fissure en mode I ou II. On peut obtenir les relations suivantes (Gasc-Barbier et al., 2020) :

$$\Delta T = \frac{\sigma_1(\text{initial}) - \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}}}{E \cdot \alpha} \cdot (1 - n)$$

pour le mode I et

$$\Delta T = \frac{\mp 2 \frac{K_{IIc}}{\sqrt{\pi a}} + \sigma_{1(initial)} + \sigma_{2(initial)}}{\alpha \cdot E} \cdot (1 - \nu)$$

pour le mode II

En considérant des contraintes initiales nulles (un calcul 3D réalisé avec CESAR-LCPC montre que les contraintes autour de la cavité sont très faibles et parfois en traction), le tableau 2 donne les variations de température nécessaires à la propagation de fissure en mode I et II. S'il existe des tractions initiales, les variations de température nécessaires peuvent être plus faibles.

Tableau 2 : variation de température nécessaire à la propagation de fissure suivant le mode de rupture considéré et en fonction de la longueur de la fissure. *Attention, ici les tractions sont positives.*

2a (mm)	σ_n	τ_{max}	ΔT KI	ΔT KII
12,4	4,51	5,02	-15,0*	-33,3
15,3	4,06	4,52	-13,5	-30,0
20	3,55	3,95	-11,8	-26,2
30	2,90	3,22	-9,6	-21,4

* cette variation de température provoque également la rupture en traction, sans nécessiter d'invoquer la mécanique de la rupture

On s'aperçoit que les variations de température suffisantes pour propager des fissures sont compatibles avec les mesures sur le site.

Conclusion

Le travail réalisé dans le cadre de C2ROP et présenté ici a été essentiellement consacré à la caractérisation expérimentale en laboratoire de l'influence des cycles thermiques sur les instabilités rocheuses, après avoir ce phénomène en évidence, grâce à l'analyse des mesures de déplacements effectuées *in situ* grâce aux fissuromètres et extensomètres de forage.

De premiers développements analytiques basés sur la théorie de la mécanique de la rupture ont permis de montrer que les hypothèses semblaient réalistes. Néanmoins il reste un important travail de développement analytique à faire pour proposer une loi de comportement prenant en compte l'endommagement de la roche lors de la répétition des cycles thermiques.

On peut enfin noter que le phénomène décrit ici n'est pas anecdotique et son étude mérite d'être approfondie. En effet, dans la vallée de la Loire, près de Tours, une autre falaise de calcaire sous-cavée a également connu un effondrement (en 2018) attribué à une forte variation de température entre le jour et la nuit avant l'effondrement.

Bibliographie

Attewell, P. B. and Farmer, I. W., 1973, Fatigue behaviour of rock, Int J of Rock Mech and Mining Sc & geomech. Abst., 10(1) : 1-9.

Arnould O., Hubert, O., Hild, F. (2004) *Thermomechanical properties and fatigue of nanocrystalline Ni/Cu electrodeposits*. In: P.M. Anderson, T. Foecke, A. Misra and R.E. Rudd

(Ed). *Nanoscale Materials and Modeling - Relations Among Processing, Microstructure and Mechanical Properties*, CA, pp. 357-362al., 2004

Bagde et Petroš, 2005 Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42 (2005) : 237-250.

Bagde, M. N. and Petroš, V., 2009, Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (2009) : 200-209.

Clément C. (2008). Auscultation d'un versant rocheux soumis aux sollicitations thermiques naturelles. Cas des Rochers de Valabres (Alpes-Maritimes), thèse de l'école des Mines de Nancy, France.

Engerand, J.-L. (1990) "*Mécanique de la rupture*". Techniques de l'Ingénieur, Ref : B5060 v1, 13 pages

Gasc-Barbier M., Virely D., Guittard J. (2015) "*Thermal fatigue in rocks – La Roque-Gageac case study*". Proc ISRM 2015. 10-13 May 2015, Montréal

Gasc-Barbier M., Merrien-Soukatchoff V., Berest P., 2017, *Thermomécanique des Roches (Manuel de mécanique des roches V)*, Presses de l'École des Mines de Paris, 427 pages, ISBN 978-2-35671-465-7.

Gasc-Barbier et Merrien—Soukatchoff, (2019) Effect of natural thermal cycles on rock slopes stability – study of 2 French sites. 14è ISRM, 13-18 sept 2019. Foz de Igaçu

Gasc-Barbier M., Merrien-Soukatchoff V., Dufour N., (2020) The role of natural thermal cycles on a limestone cliff. *Engineering Geology. Soumis*

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(3): 331-349.

Hall, K., 1999. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. *Geomorphology*, 31(1-4): 47-63.

Hall, K. (2011) "*Natural building stone composed of light-transmissive minerals: impacts on thermal gradients, weathering and microbial colonization. A preliminary study, tentative interpretations, and future directions*". *Environmental Earth Sciences*, 62, 289-297.

Hall, K. and Thorn C.E. (2014) "*Thermal fatigue and thermal shock in bedrocks: An attempt to unravel the geomorphic processes and products*". *Geomorphology* 206(1): 1-13

ISRM, 2015, *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, in: R. Ulusay (Ed.).

Le Ber M. & Other Duthoit L.(1987) Désagregation des parois rocheuses et climat : approche thermique et thermodynamique. *Bul. De l'association française pour l'étude du quaternaire (in French)*. 24(3) : 147-159.

Merrien-Soukatchoff et Gasc-Barbier 2020 Effect of thermal cycles on rock outcrops" *"XIII International Symposium on Landslides – à paraître*

Merrien-Soukatchoff, V., Clément, C., Gunzburger, Y. (2007) "*Thermal effects on rock slopes: Case study of the "Rochers de Valabres" slope (France)*". ISRM 2007, Specialized Sessions on Rockfall-Mechanism and Hazard Assessment, Lisbon, Portugal.

Ruiz. D.F., 2013. Thermomechanical analysis of the stability of a rock-cliff under climatic actions. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/2099.1/17241> Master thesis.

Saint-Leu, C. and Sirieys, P., 1971, La fatigue des roches, *Proceedings of the International Symposium Rock Fracture, ISRM, Nancy, France*, pp. No. II-18.

Vargas JR.E., Castro J.T, Amaral C., Figueireido R.P. (2004). On mechanisms for failures of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil: thermal fatigue? *Landslides : evaluation*

and stabilization, Proc.9th International Symposium on Landslides (28 juin-2juillet 2004, Rio de Janeiro, Brésil), Lacerda et al. éditeurs, Taylor & Francis Group, London, ISBN 04-1535-665-2

Villarraga-Diaz C.J. Effect of thermal cycles in rock mass stability. PhD thesis. Universitat Politècnica de Catalunya – Université Toulouse III Paul Sabatier. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01842316/document>

Villarraga, C.J., Gasc-Barbier, M., Vaunat J., Darozes J. (2018) "*The effect of thermal cycles on limestone mechanical degradation*". Int J. of Rock Mech and Min. Sc. 109 115-123.