

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

CARACTÉRISATION PAR ANALYSE VIBRATOIRE DE L'ENDOMMAGEMENT D'UN ÉCO-MATÉRIAU NATUREL (LAUZE CALCAIRE) SOUMIS A DES CYCLES DE GEL/DÉGEL

FOGUE DJOMBOU Yannick Igor^A, CORN Stéphane^A, GARCIA-DIAZ Eric^A

A Centre des Matériaux des Mines d'Alès, IMT Mines Alès, Université de Montpellier, 6 avenue de Clavières, 30319, Alès Cedex, Franc

Résumé : La lauze calcaire est un matériau naturel utilisé pour la couverture, notamment dans le sud du massif central situé en France où il constitue un élément clé du paysage et du patrimoine architectural. Cet éco-matériau est une roche sédimentaire provenant de l'accumulation en lit de sédiments calcaires dans des milieux marins peu profonds et calmes (lagune, lac,...), formée pour la plus part il y a 100 à 200 millions d'années. Ce matériau est soumis en service à des conditions environnementales sévères et cyclées (gel/dégel) pouvant entraîner un endommagement mécanique susceptible de compromettre son utilisation. Cet endommagement est généralement associé à une perte de rigidité du matériau, rendant ainsi possible sa détection et son suivi à l'aide de techniques d'analyse non-destructives en vibration libre. Cette étude présente l'utilisation de l'essai au marteau de choc instrumenté pour la caractérisation de l'endommagement d'échantillon de lauzes calcaires soumises à des cycles contrôlés de gel/dégel. Les fréquences propres et les taux d'amortissement des échantillons s'avèrent très sensibles aux variations de l'intégrité de la roche. En outre, les différences de tendance observées sur les fréquences propres traduisent l'anisotropie initiale des matériaux et induite par l'endommagement. A terme, le calcul des modes propres de la structure par éléments finis associé à une procédure de recalage paramétrique permettra un suivi des coefficients élastiques d'un modèle orthotrope du matériau.

Mots-clés : lauze calcaire, matériau naturel, cycle gel/dégel, suivi non-destructif, analyse vibratoire, FEM.

1. INTRODUCTION

La lauze (Laycock et al., 2018) (fig.1) est une pierre naturelle en plaquette qui est utilisée pour la couverture, notamment dans l'architecture vernaculaire dans le massif central. Ce matériau peut être d'origine métamorphique (ardoise (Cárdenes et al., 2014)), sédimentaire (grès, calcaire (Laycock et al., 2018 ; Ingham, 2013; Swinburne & Hemleben, 1994)), ou magmatique (phonolite). Ce matériau de couverture est utilisé dans de nombreuses régions d'Europe (France, Italie, Espagne, Grande Bretagne (Cárdenes et al., 2014)) et participe à l'authenticité et le caractère de ces régions, comme c'est le cas dans le Massif Central en France, où elle constitue un élément clé du paysage culturel agropastoral méditerranéen du périmètre "Causses et Cévennes" inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. Ce matériau de construction soumis à des conditions environnementales agressives peut subir des dommages, compromettant ainsi sa fonction d'étanchéité. Les cycles de gel/dégel peuvent entraîner à de telles conditions environnementales agressives. Ainsi, ce protocole a souvent été utilisé pour étudier la durabilité des calcaires utilisés dans la construction du patrimoine (Walbert et al., 2015 ; Eslami et al., 2018).



Figure 1. Lauze calcaire du Causse du Larzac (Aveyron – France)

La formation de lauze calcaire résulte de la cyclicité dans les conditions de dépôt des sédiments dont elle se compose. Cette cyclicité peut se traduire soit par une modification du taux d'apport de sédiments, soit par une modification de la composition des sédiments (Swinburne & Hemleben, 1994; Flügel, 2004). Les conditions de formation de ce matériau font que sa structure est semblable à un matériau stratifié. Ainsi pour son étude l'hypothèse de matériau orthotrope est adoptée, comme c'est le cas dans les matériaux stratifiés (Lauwagie, 2003). Dans la plupart des cas, les méthodes basées sur le suivi des ondes ultrasonores sont utilisées pour caractériser l'endommagement des calcaires soumis à des cycles de gel/dégel. (Walbert et al., 2015 ; Martínez-Martínez, 2013; Eslami et al., 2018). (Saad, 2011) avait montré que la méthode vibratoire et la méthode par ultrasons sont deux méthodes équivalentes pour caractériser les dommages (Allison, 1988; Saad & Bost, 2010), et que la méthode de vibration est plus adaptée pour la surveillance du calcaire soumis au cycle gel-dégel, car elle est plus sensible aux changements structurels que la méthode par ultrasons (Saad & Bost, 2009; Saad et al., 2010). La surveillance des dommages par vibration est fréquemment utilisée dans le suivi de l'endommagement des bétons soumis à des cycles de gel-dégel (Wu et al., 2016; Matakah & Soroushian, 2018; Lund et al., 2018). En particulier, (Lund et al, 2018) utilisent l'analyse modale opérationnelle (OMA) (Brincker & Ventura, 2015) pour évaluer les dommages d'un béton perméable soumis à des cycles de gel-dégel. Dans ce cas, toutes les fréquences étaient pareillement sensibles aux dommages, ce qui ne sera pas le cas pour les pierres naturelles. Le taux d'amortissement n'est pas souvent utilisé pour le suivi de l'endommagement des calcaires ou des bétons soumis à des cycles de gel-dégel. Comme il est rapporté dans (Cao et al., 2017), l'utilisation du taux d'amortissement pour l'évaluation des dommages dans une structure présente de nombreux avantages tels que plus de sensibilité par rapport à la fréquence sur l'évaluation des dommages (Shahzad, 2013) où dans certains cas, alors que la fissure est indétectable, il est possible de mesurer une augmentation du taux d'amortissement de l'ordre de 50% (Modena et al., 1999).

Le but de ce travail est alors d'étudier le suivi de la réponse en vibration d'un échantillon de lauze calcaire soumis à des cycles de gel-dégel. Et ensuite à partir d'une procédure de recalage numérique-expérimental sur un modèle FEM isotrope puis orthotrope du matériau, il sera déterminé l'impact qu'a eu l'endommagement sur ses paramètres mécaniques.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Caractéristiques du matériau utilisé

L'échantillon de lauze utilisé pour l'étude provient de la carrière Montdardier située dans le Gard en France. Cette carrière est connue pour son utilisation en lithographie. C'est un calcaire micritique fait de 96% de calcite pure, 1% de petit quartz, 1% de pyrite et 2% de petit bioclaste (Bodeur, 1994). Il est très peu poreux (~1% de porosité). Un échantillon de géométrie plaque a été taillé dans une lauze de cette carrière.

Origine	Echantillon	Caractéristiques	Exemple de construction
Montdardier (Gard- France)		Masse = 2300 g Longueur = 227 mm Largeur = 157 mm Epaisseur = 25 mm	

Table 1: Echantillon utilisé pour l'expérience

2.2 Cycles de gel-dégel

Les cycles de gel/dégel ont été réalisés dans l'enceinte Dycometal (model CHD – 525). Avant le cyclage, l'échantillon a été immergé sous eau pendant 48 heures à 20 degrés. Le cycle dure 4 heures, et il a été choisi pour être plus sévère que le test recommandé par la norme sur les calcaires (norme 12371). Il se décompose en quatre parties: (1) diminution de la température dans l'enceinte de 20°C à -30°C pendant 30 min à l'air libre, (2) gel à température constante à -30°C pendant 1h30, (3) augmentation de la température de -30°C à 10°C pendant 30 min, (4) et enfin dégel à température constant sous eau à 10°C pendant 1h30. Le dégel se fait sous eau à fin de conserver la teneur d'eau constante dans les échantillons. Après les dix premiers cycles, et tous les 20 cycles, l'échantillon est sorti de l'enceinte pour faire le suivi de sa réponse vibratoire.

2.3 Suivi de l'endommagement par analyse vibratoire

2.3.1 Dispositif d'acquisition fréquentiel

Un marteau instrumenté Kistler a été utilisé pour faire un choc sur l'échantillon afin de le mettre en vibration. Grâce à un accéléromètre Kistler installé sur l'échantillon, les vibrations de la structure sont réceptionnées à partir d'un système d'acquisition National Instrument (USB-4431) et la Fonction de Réponse Fréquentiel (FRF) est enregistrée et représentée dans le logiciel ModalView. Dans le but de maximiser la qualité de détermination des paramètres modaux, des conditions au limite libre-libre sont adoptées. Pour cela, l'échantillon a été placé sur des supports en mousse. (fig. 2) (Corn et al, 2009)

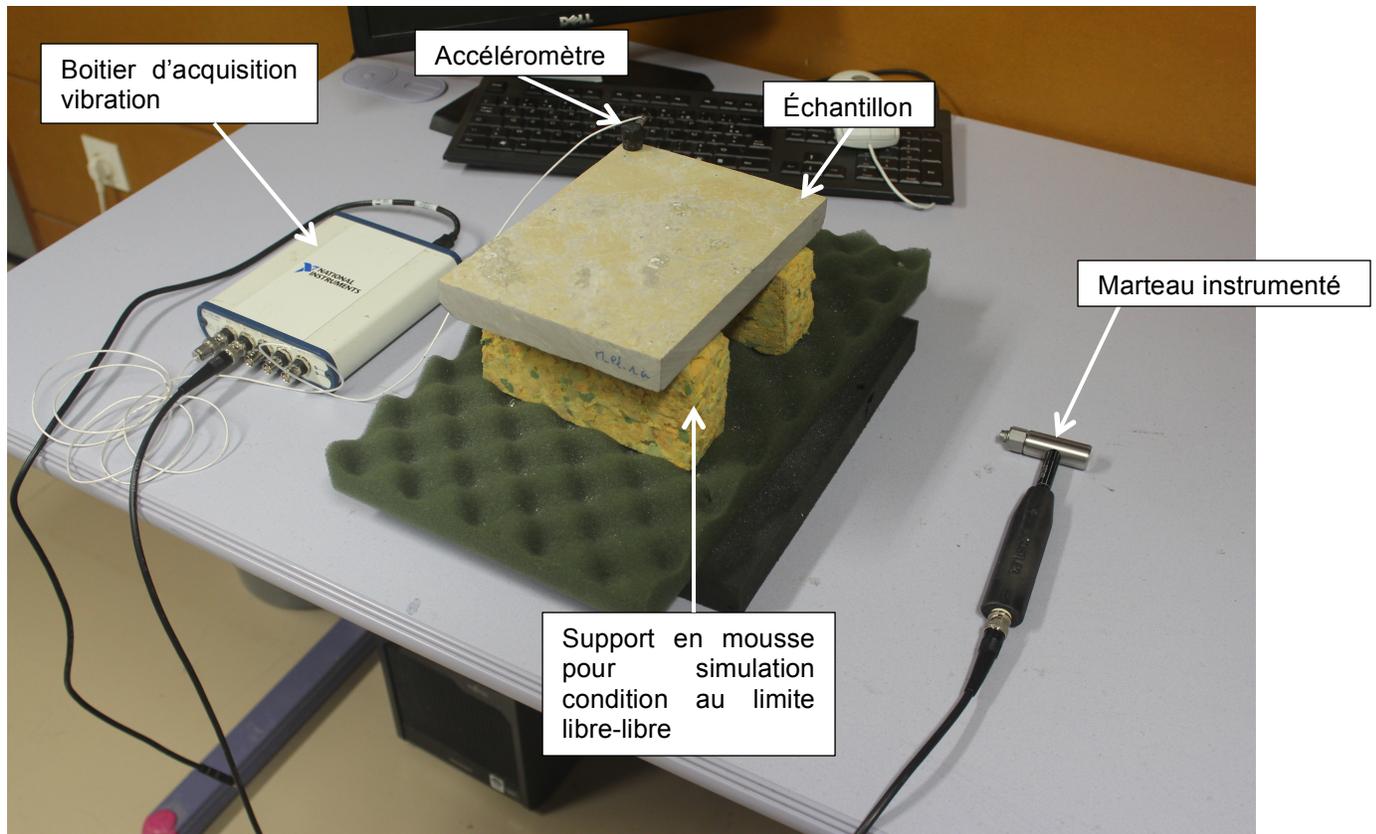


Figure 2. Disposition d'acquisition des paramètres vibratoires

2.3.2 Paramètres de suivi de l'endommagement

Les paramètres modaux ont été obtenus grâce à la FRF à partir des techniques de curve fitting disponible dans le logiciel ModalView. Les techniques de curve fitting consistent à construire une courbe ou une fonction mathématique qui a la meilleure correspondance avec une série de points (David, 1984; Chalko et al., 1996). A partir de la FRF recalée, les fréquences naturelles ($f_i(n)$) et les taux d'amortissement ($DR_i(n)$) des modes i après n cycles sont obtenus pour les cinq premiers modes. Pour chaque fréquence naturelle obtenue après n cycles, la variation relative du module d'Young (Lund, 2018) ($RDME_i(n)$) est calculée à partir de l'équation (1) :

$$(1) RDME_i = \left(\frac{f_i^2(n)}{f_i^2(0)} \right) \times 100 (\%)$$

où,

$f_i(n)$ = fréquence naturelle du mode i après n cycles de gel-dégel;

$f_i(0)$ = fréquence naturelle initiale du mode i .

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Suivi vibratoire de l'endommagement des lauzes soumis au cyclage gel/dégel

Le premier résultat de cette étude concerne la sensibilité des fréquences à l'endommagement pendant les cycles de gel/dégel. Pour qu'une variation des fréquences soit interprétée comme une sensibilité à un endommagement, il faudrait une variation minimale de 5% (Salawu, 1997), comme c'est le cas pour les divers modes suivis ici. On observe que la sensibilité à l'endommagement est différente en fonction des modes.

Le second résultat de cette étude concerne les amortissements. Les amortissements augmentent avec la sensibilité des fréquences à l'endommagement. L'augmentation de ces amortissements est certainement

due aux frictions qui se produisent pendant la vibration au niveau des endommagements (fissures) qui sont créés lors des cycles de gel/dégel.

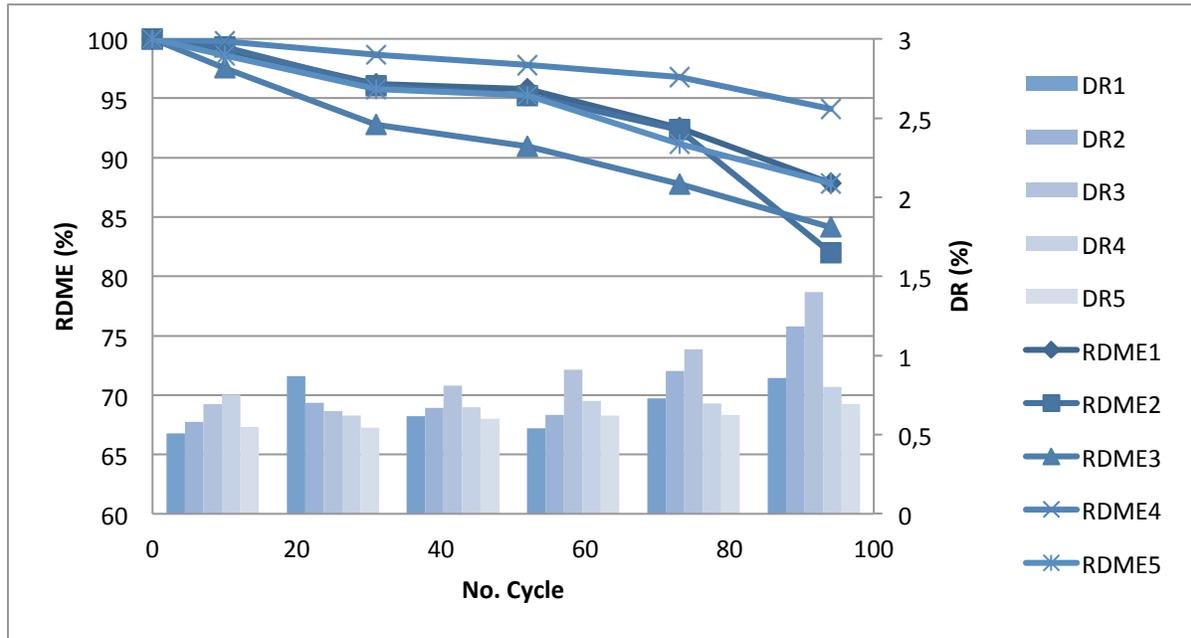


Figure 3. Suivi des paramètres fréquentiels et amortissements de l'échantillon soumis à des cycles de gel/dégel

3.2 Discussion sur l'influence des paramètres mécaniques

Pour caractériser l'influence de l'endommagement causé par les cycles de gel-dégel sur les propriétés mécaniques de notre lauze, nous avons procédé par analyse inverse en utilisant un modèle élément fini. Cette analyse a été réalisée avec le logiciel d'élément fini COMSOL. La figure ci-dessous montre les cinq premiers modes qui ont été analysés. Le modèle COMSOL a été défini à partir des informations de l'échantillon (masse, dimension,...) et en considérant pour les caractéristiques mécaniques un modèle isotrope puis par la suite orthotrope, en vertu des raisons évoquées en préambule (matériau sédimentaire).

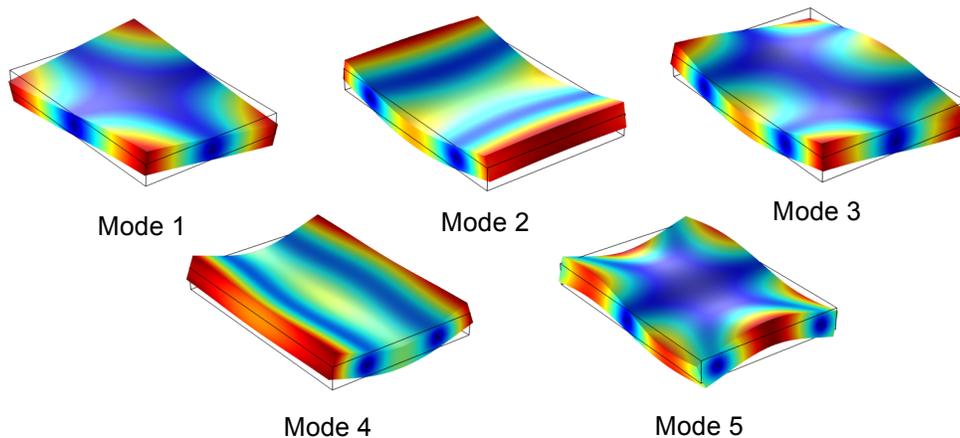


Figure 4. Cinq premiers modes du modèle EF COMSOL utilisés pour la détermination des paramètres mécaniques

Une application a été développée à partir de l'API JAVA de COMSOL dans le but d'obtenir les paramètres mécaniques de la lauze. Cette application est basée sur une procédure d'identification mixte numérique-expérimentale. (Cugnoni, 2005). Cette procédure repose sur la minimisation d'une fonction appelée fonction coût, qui est définie ici par la différence relative quadratique entre les fréquences obtenues expérimentalement et celles obtenues numériquement via le modèle élément fini (2) (Lauwagie, 2003).

$$(2) \varepsilon = \sum |f_{num}(i) - f_{exp}(i)| \quad \text{fonction coût à minimiser}$$

Où,

$f_{num}(i)$ = fréquence naturelle du mode i obtenue numériquement par le modèle EF

$f_{exp}(i)$ = fréquence naturelle du mode i obtenue expérimentalement par l'analyse vibratoire

L'algorithme développé dans l'API du logiciel COMSOL pour minimiser l'écart entre les valeurs numériques et les valeurs expérimentales est l'algorithme de minimisation des moindres carrés non linéaires de Levenberg-Marquardt.

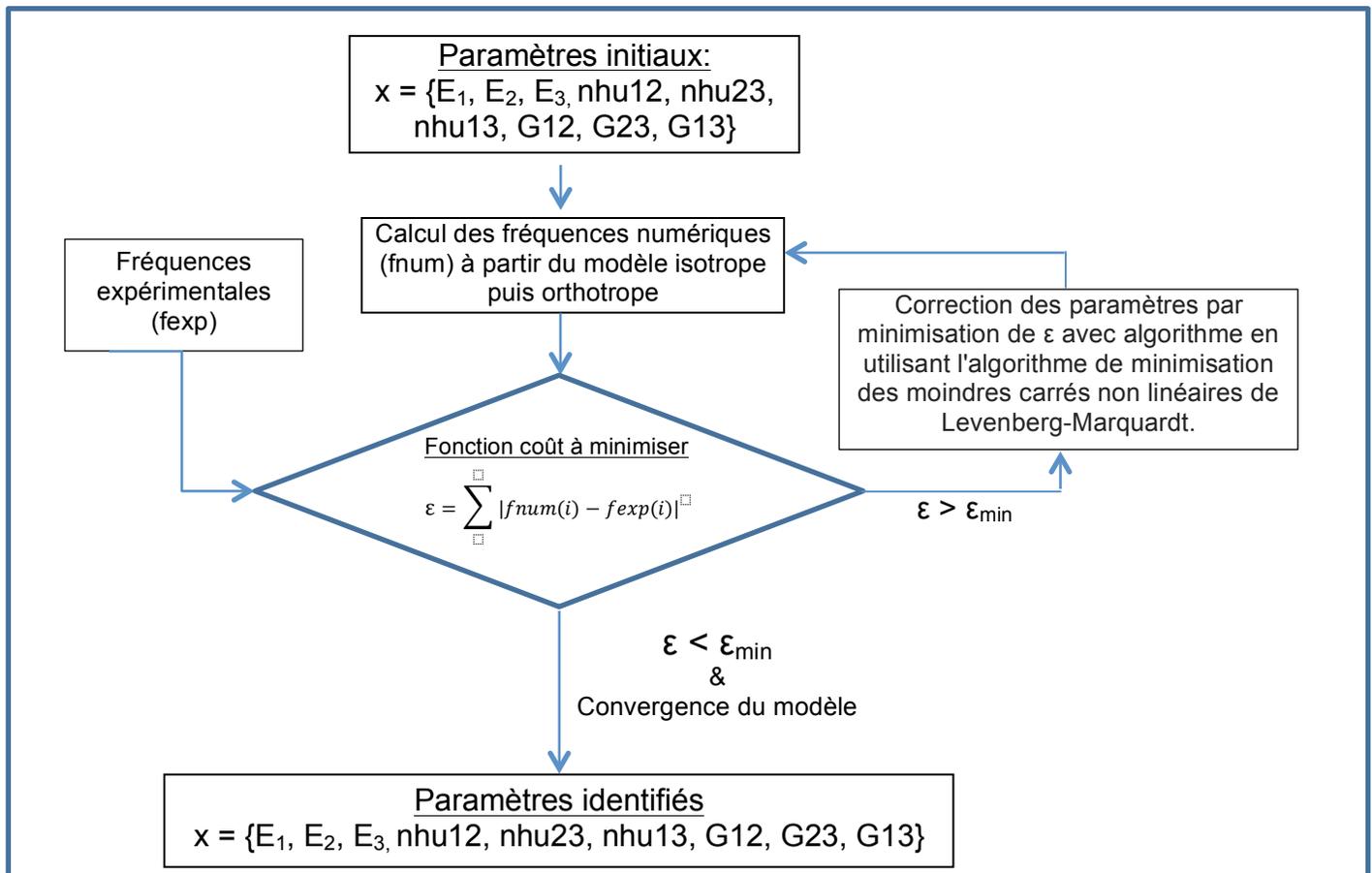


Figure 5. Principe de résolution itérative du problème numérique inverse d'identification des paramètres mécaniques

Avant d'obtenir les paramètres mécaniques du modèle orthotrope par méthode inverse, ces paramètres sont d'abord obtenus en considérant un modèle isotrope. Ce sont ces valeurs qui nous serviront de valeurs initiales pour le modèle orthotrope. Avant de procéder à la détermination des paramètres mécaniques, on procède à une analyse des sensibilités pour déterminer les paramètres mécaniques qui sont les plus sensibles à de faibles variations des modes utilisés pour procéder au recalage du modèle. Les tableaux (tableau 2 et 3) ci-dessous résument les résultats obtenus pour l'échantillon à l'état avant

qu'il subisse les cycles et après qu'il ait subi les 94 cycles, pour un modèle isotrope puis pour un modèle orthotrope, avec l'indication des paramètres mécaniques dont l'obtention est pertinent :

Modèle isotrope		
	Etat initial	Après 94 cycles
E (GPa)	59,44	50,87
ν	0,28	0,34
G (GPa)	23,23	18,94
Erreur sur le modèle (ϵ)	5,64E-4	1,82E-3

Tableau 2 : paramètres mécaniques obtenus par analyse inverse sur modèle isotrope avant et après 94 cycles

Modèle orthotrope			
	Sensibilité paramètre	Etat initial	Après 94 cycles
E1 (GPa)	12,21	57,47	55,95
E2 (GPa)	15,84	61,85	49,05
E3 (GPa)	0,36	59,43	50,73
ν_{12}	2,24	0,29	0,26
ν_{23}	0,49	0,26	0,17
ν_{13}	0,64	0,24	0,26
G12 (GPa)	17,14	23	19,56
G23 (GPa)	1,99	22,98	16,46
G13 (GPa)	1,54	22,78	15,35
Erreur sur le modèle (ϵ)		8,16E-5	7,66E-4

Tableau 3 : paramètres mécaniques obtenus par analyse inverse sur modèle orthotrope avant et après 94 cycles

Le fait que l'erreur sur le modèle diminue entre le modèle isotrope et le modèle orthotrope justifie bien que le choix du modèle orthotrope est plus adéquat. Cependant il y a encore une erreur résiduelle qui subsiste et qui augmente entre l'état initial et l'état après 94 cycles de gel/dégel. Cette erreur pourrait être un indicateur d'endommagement. En effet, la présence de défaut dans la structure fausse le modèle orthotrope en induisant de l'anisotropie due à l'endommagement qu'il génère.

4.3 CONCLUSION

La présente étude portait sur une méthode de suivi de l'endommagement d'un éco-matériau lorsqu'il est soumis à des cycles de gel-dégel. Cette méthode est basée sur l'analyse de la réponse vibratoire d'un échantillon lorsqu'il est sollicité par un choc à l'aide d'un marteau. A partir de la réponse fréquentielle de la structure, il est possible d'évaluer l'endommagement de la structure à partir des paramètres mécaniques

de l'échantillon obtenue par recalage numérique-expérimental d'un modèle EF isotrope puis orthotrope. Les principales conclusions de l'étude sont les suivantes :

1) l'utilisation de l'analyse vibratoire est efficace pour suivre l'endommagement d'échantillon de lauze soumis à des cycles de gel-dégel : tandis que le suivi des fréquences nous renseigne sur l'apparition d'endommagement via les modes les plus sensibles à cet endommagement, le taux d'amortissement nous renseigne sur la gravité de cet endommagement.

2) l'utilisation d'un modèle élément fini orthotrope est plus adaptée pour déterminer les paramètres mécaniques de nos matériaux naturels (sédimentaire). En effet, bien qu'à l'état initial, une certaine isotropie est observée à travers les paramètres mécaniques, après endommagement le choix du modèle orthotrope permet de savoir quels paramètres mécaniques sont les plus sensibles à l'endommagement.

3) la présence d'erreur sur le modèle à l'état initial peut traduire la présence de défaut, et l'augmentation de cette erreur après les cycles peut traduire l'apparition ou l'augmentation de la sévérité de défaut dans le matériau.

Grâce à cette méthode, il est possible de retrouver les paramètres mécaniques du matériau, et donc la matrice de complaisance. Ainsi par la suite, à partir de la détermination du champ de déformation, il sera possible de déterminer le champ de contrainte dans le matériau.

Remerciements

Les auteurs adressent naturellement leur remerciement au CGET du massif central qui a financé le programme LAUBAMAC dont fait partie ce travail. Les auteurs tiennent également à manifester leur gratitude envers les carrières de lauze calcaire (Montdardier, SAS Lauzas, ALLA) pour avoir mis à disposition les échantillons qui nous ont permis de mener cette étude.

RÉFÉRENCES

- R.J. Allison, A (1988) non-destructive method of determining rock strength, *Earth Surf. Process. Landforms*. 13, 729–736. doi:10.1002/esp.3290130807.
- Y. Bodeur, (1994) The Upper Jurassic lithographic limestones of the Causse de Blandas-Montdardier (Languedoc, France) in their palaeostructural framework, *GEOBIOS*. 16 219–225.
- R. Brincker, C. Ventura, (2015) *Introduction to Operational Modal Analysis*, Wiley-Blackwell; 1 edition.
- M.S. Cao, G.G. Sha, Y.F. Gao, W. Ostachowicz, (2017) Structural damage identification using damping: A compendium of uses and features, *Smart Mater. Struct.* 26. doi:10.1088/1361-665X/aa550a.
- B. Christaras, F. Auger, E. Mosse, (1994) Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods, *Mater. Struct.* 27, 222–228. doi:10.1007/BF02473036.
- V. Cárdenes, Á. Rubio-Ordóñez, C. Monterroso, F.J. Mateos, 15 (2014) Guidelines for selecting roofing slate for the restoration of historical buildings and monuments: two case studies, *J. Cult. Herit.*, 203–208. doi:10.1016/j.culher.2013.02.004.
- V. Cárdenes, Á. Rubio-Ordóñez, J. Wichert, J.P. Cnudde, V. Cnudde, (2014) Petrography of roofing slates, *Earth-Science Rev.* 138, 435–453. doi:10.1016/j.earscirev.2014.07.003.
- T.J. Chalko, N. Haritos, V. Gershkovich, (1996) Non-linear curve fitting for modal analysis, *Environ. Softw.* 11, 9–18. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0266-9838(96)00016-0.
- T.C. Chen, M.R. Yeung, N. Mori, (2004) Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action, *Cold Reg. Sci. Technol.* 38, 127–136. doi:10.1016/j.coldregions.2003.10.001.
- S. Corn, P. Lenny, J.S. Dupuy, L. Daridon, (2009) Identification des propriétés viscoélastique d'un PMMA par analyse vibratoire : comparaison entre différentes méthodes expérimentales, *19^{ème} Congès Français de Mécanique*, 24–28 août 2009, Marseille.
- J. Cugnoni (2005), Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites.
- John, E. David (1984), *Modal Testing: Theory, Practice and Applications*, Research Studies Pr.
- J. Eslami, C. Walbert, A.L. Beaucour, A. Bourges, A. Noumowe, (2018) Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles, *Constr. Build. Mater.* 162, 420–429. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.031.

EN 12371. Natural Stone tests methods: determination of frost resistance. Bruxelles: European Committee for Standardization; 1966, n.d.

E. Flugel, (2004) *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-662-08726-8.

J.P. Ingham (2013), Roofing slate, *Geomaterials Under Microsc.* p.51-60.

T. Lauwagie, H. Sol, G. Roebben, W. Heylen, Y. Shi, O. Van der Biest, (2003) Mixed numerical-experimental identification of elastic properties of orthotropic metal plates, *NDT E Int.* 36 487–495. doi:10.1016/S0963-8695(03)00048-3

E.A. Laycock, D. Jefferson, S. Hetherington, F. Clegg, C. Wood, (2018) Revitalising Collyweston limestone slate production by artificial freeze/thaw splitting, *Constr. Build. Mater.* 159 486–498. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.039.

M.S.M. Lund, K.K. Hansen, R. Brincker, A.H. Jensen, S.D.R. Amador, (2018) Evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete by use of operational modal analysis, *Cem. Concr. Res.* 106, 57–64. doi:10.1016/j.cemconres.2018.01.021.

J. Martínez-Martínez, D. Benavente, M. Gomez-Heras, L. Marco-Castaño, M.Á. García-Del-Cura, (2013) Non-linear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes, *Constr. Build. Mater.* 38, 443–454. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.059.

C. Modena, D. Sonda, D. Zonta, (1999) Damage Localization in Reinforced Concrete Structures by Using Damping Measurements, *Key Eng. Mater.* 167–168, 132–141. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.167-168.132.

SAAD Alice, GUEDON Sylvine, MARTINEAU François, (2010) Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters., *Comptes Rendus Geosci.* 197–203.

A. Saad, M. Bost, (2010) The resonant frequency measurement and cracking evolution in rocks, *Rock Eng. Difficult Gr. Cond. - Soft Rocks Karst - Proc. Reg. Symp. Int. Soc. Rock Mech.* EUROCK 2009, 345–350.

A. Saad, (2011) Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fracturés : rôle des fluides dans leur processus d'altération.

O.S. Salawu, (1997) Detection of structural damage through changes in frequency: a review, *Eng. Struct.* 19, 718–723. doi:10.1016/S0141-0296(96)00149-6.

Shahzad S, (2013) Detection of corrosion-induced damage in reinforced concrete beams based on structural damping identification, in: *Proc. 13th East Asia-Pacific Conf. Struct. Eng. Constr. G-2-4*, n.d.

SWINBURNE N.H.M., HEMLEBEN C., (1994) The Plattenkalk facies : a deposit of several environments., *GEOBIOS.* 313–320.

F. Renard, (2004) Three-dimensional roughness of stylolites in limestones, *J. Geophys. Res.* 109 B03209. doi:10.1029/2003JB002555.

WALBERT Charlotte, ESLAMI Javad, BEAUCOUR Anne-Lise, BOURGES Ann, NOUMOWE Albert, (2015) Evolution of the mechanical behaviour of limestone subjected to freeze thaw cycles, *Env. Earth Sci.* 6339–6351.

H. Wu, Z. Liu, B. Sun, J. Yin, (2016) Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC), *Constr. Build. Mater.* 117, 63–71. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.130.