

---

# Influence des caractéristiques intrinsèques et environnementales sur l'endommagement des pierres de construction par cycles de gel-dégel

Martin Vigroux<sup>1,\*</sup>, Javad Eslami<sup>1</sup>, Anne-Lise Beaucour<sup>1</sup>, Ann Bourguès<sup>2,3</sup>, Albert Noumowé<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Cergy-Pontoise, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, EA4114, F-95000 Cergy-Pontoise, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Ministère de la Culture et de la Communication, 29 rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne, France

<sup>3</sup> Sorbonne Universités, Centre de Recherche sur la conservation (CRC, USR 3224), Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de la Culture et de la Communication, CNRS, CP21, 36 rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris, France

\* Corresponding author : [martin.vigroux@u-cergy.fr](mailto:martin.vigroux@u-cergy.fr)

---

**RÉSUMÉ.** L'objectif de ces travaux de recherche est d'approfondir la compréhension des mécanismes de dégradation des pierres de construction, utilisées dans le patrimoine bâti, vis-à-vis d'une sollicitation cyclique de gel-dégel. Ainsi, sept pierres de nature minéralogique différente et présentant des propriétés physico-mécaniques variées sont soumises à un vieillissement accéléré. L'évolution de l'endommagement au cours de ces cycles est assurée à travers la mesure de différents paramètres : vitesse des ondes P, résistance en compression et traction, module d'Young, porosité, ténacité. Par ailleurs, le comportement thermomécanique est également étudié par des mesures de déformations et de gradients thermiques. Les premiers résultats permettent d'établir que la vitesse des ondes P, peut être considérée comme étant le paramètre matériau traduisant le mieux l'endommagement subi. De plus, il apparaît clairement que le degré de saturation en eau joue un rôle prépondérant sur l'altération engendrée, et qu'il existe une valeur critique, pouvant être définie pour chaque type de pierre.

**ABSTRACT.** The aim of these research works consists in improving the understanding of the damage mechanisms of built heritage stones subjected to freeze-thaw cycles. Thus, seven stones with different mineralogy and various physico-mechanical properties undergo an accelerated ageing. The damage evolution during these cycles is followed through measurement of several parameters : P-wave velocity, compressive and tensile strength, Young modulus, total water porosity and toughness. Besides, thermo-mechanical behaviour is also studied through strain and thermal gradient monitoring. The first results indicate that P-wave velocity can be considered as being the material parameter that best reflects the decay. Moreover, it appears distinctly that the initial water degree of saturation is a key factor on the damage evolution, and it exists a critical threshold that can be defined for each type of stone.

**MOTS-CLÉS :** pierre, altération par gel-dégel, suivi de l'endommagement, saturation critique en eau, fissuration

**KEY WORDS :** stone, frost weathering, decay evolution, critical water saturation, cracking

---

## 1. Introduction

Afin de préserver et conserver le patrimoine bâti durablement, il convient de connaître et comprendre les mécanismes de dégradation des pierres de construction. Sous l'action de conditions environnementales sévères, les matériaux de construction subissent une modification de leur microstructure et de leurs propriétés physiques. Il peut alors s'en suivre une altération de leur comportement mécanique en déformation et rupture. De nombreux auteurs [BEC 06; BOU 06; SAA 11] ont étudié les évolutions des propriétés physico-chimiques et des propriétés de transfert des pierres après altération. Cependant, l'endommagement mécanique et l'influence de la microstructure sur la cinétique d'altération sont toutefois peu pris en compte [WAL 15]. Des travaux précédents [CHE 04; WAL 15] ont déjà montré que l'influence du degré de saturation sur la résistance au gel-dégel des pierres est étroitement liée à la distribution porale et à la compacité des pierres. Ainsi, cette présente étude tend à établir des corrélations entre différentes propriétés des pierres à l'état sain, avec la cinétique d'altération engendrée par des cycles de gel-dégel mais aussi à mettre en avant l'existence d'un degré de saturation critique propre à chaque type de pierre.

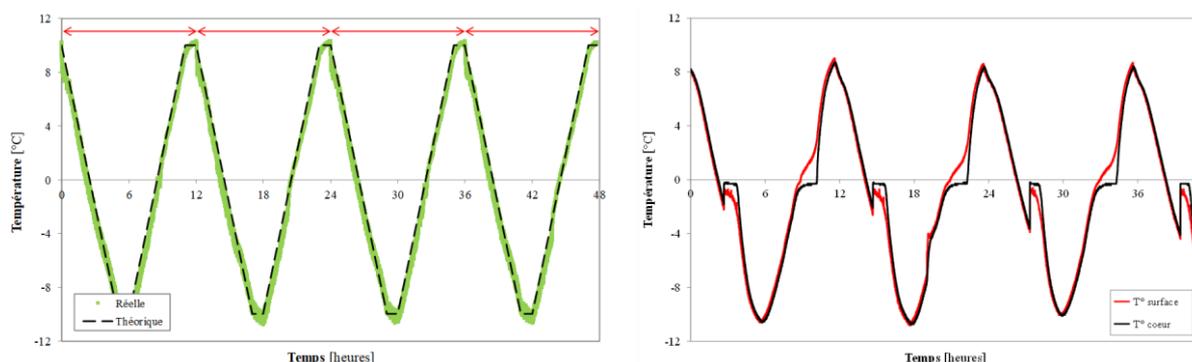
## 2. Matériaux et démarche expérimentale

### 2.1. Pierres de l'étude

Les pierres sélectionnées pour cette étude se composent en un grès des Vosges (GR) et six calcaires : Massangis (MA), Euville (EUV), Migné (MI), Saint-Maximin (MX), Savonnières (SA) et Lens (LS). Ces matériaux, provenant de diverses régions en France, sont largement utilisés comme matériaux de construction dans le patrimoine bâti. Le choix de telles pierres permet de balayer une large gamme de porosité, microstructure et propriétés mécaniques, permettant ainsi de définir quels sont les paramètres ayant une influence prépondérante vis-à-vis de l'altération par cycles de gel-dégel.

### 2.2. Procédure expérimentale détaillée

La procédure expérimentale de vieillissement thermo-hydrigue par gel-dégel a été réalisée en se basant sur la norme NF EN 1237. Ainsi, des échantillons cylindriques de dimensions 40 x 80 mm, carottés de façon perpendiculaire au litage, ont été soumis à des cycles alternant des phases de gel ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) et dégel ( $10^{\circ}\text{C}$ ) à une vitesse de  $4^{\circ}\text{C}/\text{h}$ , avec un maintien d'une heure à chaque palier. Il a été démontré [WAL 15] que le placement des échantillons dans des sacs plastiques étanches permet de conserver totalement le degré de saturation en eau initial. Le degré de saturation en eau en conditions naturelles est choisi comme la saturation de référence pour les différentes pierres. De plus, des saturations supérieures ou inférieures, sont aussi appliquées dans le but de mettre en avant l'influence de ce facteur environnemental sur l'évolution de l'endommagement par gel-dégel, mais aussi de définir une saturation critique, et de la relier aux propriétés physico-mécaniques initiales. Pour six échéances, au cours des cycles de gel-dégel, les propriétés physiques et mécaniques des pierres (résistance en compression, résistance en traction, ténacité) sont évaluées. L'évolution de l'endommagement est alors traduite à travers la variation de ces précédents paramètres. Par ailleurs, le suivi de déformation mais aussi de température tout au long des cycles, est assuré à l'aide de jauges de déformations et de thermocouples.



**Figure 1.** Températures réelle et théorique de cycles de gel-dégel (a) et température en surface et au cœur d'échantillons au cours de cycles de gel-dégel (b)

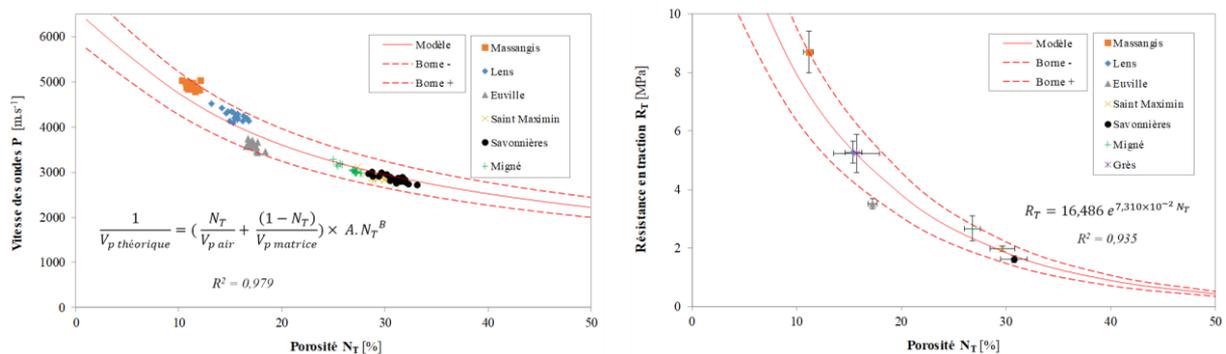
### 3. Résultats

#### 3.1. Caractérisation à l'état sain

Ces différentes pierres possèdent des propriétés physiques, mécaniques et microstructurales variées. Le tableau 1 regroupe les principales caractéristiques des pierres à l'état sain. Ainsi, les pierres de Savonnières, Saint Maximin et Migné présentent des caractéristiques similaires : une porosité élevée supérieure à 25%, s'accompagnant de résistances mécaniques faibles et ayant des propriétés de transfert hydrique importantes. Le grès des Vosges et les calcaires d'Euville et Lens sont quant à eux, moins poreux, de l'ordre de 15%, mais présentent des disparités au niveau des résistances mécaniques ( $R_C$  située entre 20 et 45 MPa). Au contraire, la pierre de Massangis, avec la porosité la plus faible, est la pierre la plus résistante mécaniquement. Des corrélations significatives sont établies entre ces différents paramètres : les figures 2(a) et 2(b) proposent une relation entre la porosité, la vitesse des ondes P et la résistance en traction.

Nom	Code	[%]	[%]	[%]	[g/m.s <sup>-1/2</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
		$N_T$	$N_{48}$	$S_{48}$	C	$R_C$	$R_T$	$E_{stat}$	$V_{P\ sec}$	$K_{eau}$
Massangis	MA	11,15	9,30	83	22,69	74,45	8,70	47,55	4912	$8,9 \times 10^{-18}$
Lens	LS	15,42	13,74	89	48,19	27,46	5,28	37,47	4247	$5,0 \times 10^{-16}$
Grès des Vosges	GR	15,73	9,69	62	54,98	46,84	5,23	25,94	3112	$4,1 \times 10^{-14}$
Euville	EUV	17,21	10,04	58	114,82	19,95	3,52	20,44	3590	$1,3 \times 10^{-15}$
Migné	MI	26,76	25,92	97	300,06	20,12	2,67	15,35	3053	$5,4 \times 10^{-15}$
Saint Maximin	MX	29,66	23,93	81	243,85	15,48	1,99	13,64	2873	$5,5 \times 10^{-13}$
Savonnières	SA	30,73	19,23	63	92,47	9,40	1,63	14,57	2871	$1,4 \times 10^{-14}$

**Tableau 1.** Récapitulatif des propriétés physico-mécaniques des pierres à l'état sain ( $N_T$  : porosité totale à l'eau ;  $N_{48}$  : porosité à 48 heures ;  $S_{48}$  : degré de saturation en eau ; C : coefficient de capillarité ;  $R_C$  : résistance en compression ;  $R_T$  : résistance en traction ;  $E_{stat}$  : module d'Young statique ;  $V_{P\ sec}$  : vitesse des ondes P mesurée à l'état se ;  $K_{eau}$  : perméabilité à l'eau)

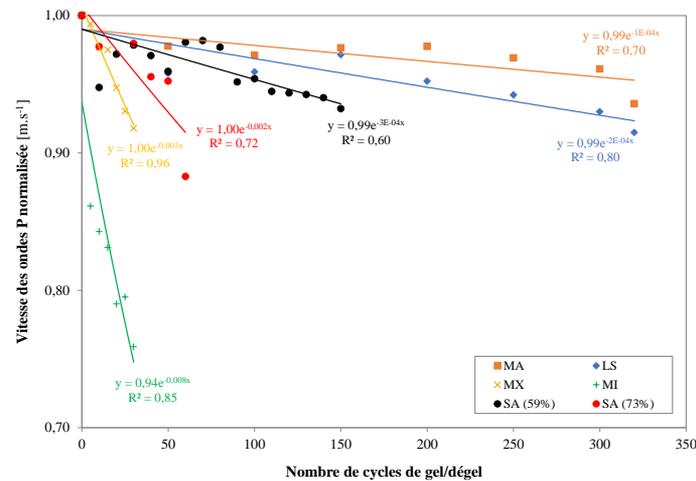


**Figure 2.** Evolution de la vitesse des ondes P (a) et de la résistance en traction (b) en fonction de la porosité

#### 3.2. Caractérisation des échantillons altérés et évaluation de l'endommagement

La figure 3 montre l'évolution de la vitesse des ondes P normalisée en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. Ces premiers résultats obtenus avec des pierres immergées pendant 48 heures seront complétés par d'autres degrés de saturation. D'une manière générale, toutes les pierres présentent une perte par rapport à leur valeur initiale, ce qui témoigne d'une modification de la microstructure avec la formation de microfissures, ou bien de l'ouverture de fissures préexistantes du matériau. Cependant, la perte relative est différente selon la pierre : la vitesse des ondes P de la pierre de Migné décroît d'environ 25% après 35 cycles, tandis que celles des pierres de Massangis et Lens ne présentent qu'une légère diminution d'environ 10% après plus de 300 cycles.

Les paramètres prépondérants sont la porosité à 48h plutôt que la porosité totale et les propriétés de rupture en traction plutôt qu'en compression. L'analyse du cas de la pierre de Savonnières qui est saturée après immersion pendant 48 heures (SA 59%), mais aussi à un degré de saturation plus élevé (SA 73%), met en évidence l'influence du degré de saturation en eau sur l'intensité de l'endommagement. Par contre, le degré de saturation « critique » varie d'une pierre à l'autre.



**Figure 3.** Evolution de la vitesse des ondes P normalisée en fonction du nombre de cycles de gel-dégel

#### 4. Conclusion

Ces travaux de recherche ont permis une meilleure compréhension des mécanismes de l'altération de diverses pierres de construction soumises à des cycles de gel-dégel :

- L'évolution de certains paramètres physico-mécaniques renseignent sur l'état d'endommagement du matériau : la vitesse des ondes P semble être celui qui traduit au mieux l'altération tout au long des cycles de sollicitation ;
- La résistance d'une pierre au gel-dégel est liée à ses propriétés physico-mécaniques et sa microstructure initiales, mais aussi à un facteur externe, dicté par les conditions environnementales : le degré de saturation en eau du matériau. De plus, il existe une valeur critique de ce paramètre, propre à chaque pierre qui sera identifiée à travers des essais réalisés actuellement ;
- La cinétique d'endommagement au gel-dégel peut être corrélée de façon significative avec certaines propriétés initiales du matériau.

#### 5. Bibliographie

- [AFN 10] AFNOR, NF EN 12371, Méthode d'essais pour pierres naturelles : détermination de la résistance au gel, 2010
- [BEC 06] BECK, K., Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2006
- [BOU 06] BOURGÈS, A., Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment, Thèse de doctorat, LMU München, 2006
- [CHE 04] CHEN, T.C., YEUNG, M.R., and MORI, N., "Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action." *Cold Regions Science and Technology* 38:127–36, 2004
- [SAA 11] SAAD, A., Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fracturés : rôle des fluides dans leur processus d'altération, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2011
- [WAL 15] WALBERT, C., Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2015