



ANNONCE DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

*Endommagement des pierres du patrimoine par les sulfates de sodium :
analyse multi-échelle par microscopie à force atomique (AFM),
spectroscopie Raman et modélisation numérique*

Présentée par
Clément MATHIEU

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN SCIENCES

Discipline : Sciences des matériaux et du patrimoine

Le mardi 1^{er} octobre 2024 à 14h00

Auditorium de la Maison Internationale de la Recherche (MIR) de CY Cergy Paris Université

Devant le jury composé de :

Anne CHABAS	Professeure, Université de Paris-Est Créteil	Rapportrice
Jérôme FORTIN	Directeur de Recherche Cnrs, ENS Ulm	Rapporteur
Hannelore DERLUYN	Chargée de Recherche Cnrs, Université de Pau et des Pays de l'Adour	Examinatrice
Julie DESARNAUD	Chercheuse, KIK-IRPA Bruxelles	Examinatrice
Pierre M. ADLER	Directeur de Recherche Cnrs émérite, Sorbonne Université	Invité
Sébastien PERALTA	Maître de Conférences, CY Cergy Paris Université	Invité
Philippe BROMBLET	Ingénieur de Recherche, CICRP	Invité
Jérôme WASSERMANN	Ingénieur de Recherche, CY Cergy Paris Université	Encadrant de thèse
Ronan L. HEBERT	Professeur, CY Cergy Paris Université	Directeur de thèse
Jean-Louis GALLIAS	Professeur émérite, CY Cergy Paris Université	Directeur de thèse

Résumé

Les pierres du patrimoine subissent différentes sollicitations mécaniques, chimiques et/ou thermiques affectant leur durabilité. Comprendre les mécanismes conduisant à la fragilisation de ces matériaux est primordiale pour développer de nouvelles pratiques de conservation ou de restauration, permettant leur sauvegarde et leur transmission aux générations futures. La cristallisation de sels au sein des pierres du patrimoine est reconnue comme une cause majeure de leur endommagement. Le dérèglement climatique accentue l'impact des sels, notamment par des variations plus fréquentes de l'environnement direct (humidité, température). Les sulfates de sodium sont très couramment rencontrés dans la nature et sont considérés comme les plus destructeurs. Bien que ces sels soient très étudiés, les mécanismes associés à l'endommagement des matériaux demeurent mal compris. L'évolution des propriétés physiques et chimiques des matériaux est révélatrice de processus d'endommagement par les sels. Le suivi quantitatif de ces propriétés, où ont lieu les processus de cristallisation, demeure un véritable challenge scientifique en particulier in situ aux échelles des pores.

Cette thèse propose une méthodologie originale multi-échelle, combinant des analyses expérimentales et numériques de deux calcaires typiques des maçonneries du patrimoine (Savonnières et Saint Maximin), pour identifier et comprendre les mécanismes d'endommagement causés par les sulfates de sodium. À l'échelle mésoscopique (cm), les propriétés de transfert des fluides des échantillons sont étudiées via des expériences de perméabilité et d'imbibition capillaire. Les propriétés mécaniques dynamiques (module d'Young et coefficient de Poisson) sont suivies dans des expériences de propagation d'ondes élastiques. À l'échelle microscopique (μm - nm), la composition minéralogique des échantillons et leurs propriétés physiques (topographie, module d'Young, dureté) sont étudiées grâce au couplage de la spectroscopie Raman et de la microscopie à force atomique. Des modélisations numériques de type LSM (Lattice Spring Model) permettent d'extrapoler les résultats expérimentaux, obtenus à l'échelle microscopique, dans un espace 3D.

Une diminution du module d'Young et de la dureté des phases carbonatées des calcaires est observée au cours des cycles suggérant des processus d'endommagement mécanique. Cette diminution est plus importante le long des plans de clivage qui seraient des zones de faiblesse où se localiserait une microfissuration. Les modèles numériques obtenus semblent rendre compte de ce phénomène. La cristallisation de gypse est observée au sein des micropores des échantillons. Des figures de dissolution de la calcite ont également été identifiées dans les mêmes zones suggérant son altération chimique par dissolution. Des processus combinés, mécaniques et chimiques, pourraient ainsi être responsables de la dégradation des pierres par les sulfates de sodium.

Mots clefs : Patrimoine bâti, Endommagement, Sulfate de sodium, Multi-échelle, AFM, Raman, LSM

Abstract

Built heritage stones suffer different solicitations (mechanicals, chemicals and/or thermicals) influencing their sustainability. Understand the mechanisms leading to the materials weakening is of paramount interest to develop new conservation or restauration practices, allowing their preservation and transmission to future generations. The salts crystallization within the heritage stones is recognized as a major cause of their damage. The global climate change increases the salts impact, in particular by the frequent variations of the direct environment (humidity, temperature). Sodium sulfates are very commonly encountered in natural environment and are recognized as the most destructive. Although these salts are highly studied, the mechanisms leading to the materials damage remain not well understood. The mechanical and chemical properties evolutions are revealing of the damage processes due to salts crystallization. The quantitative monitoring of these properties, where crystallization processes occur, remain a real scientific challenge, especially in situ at the pore scale.

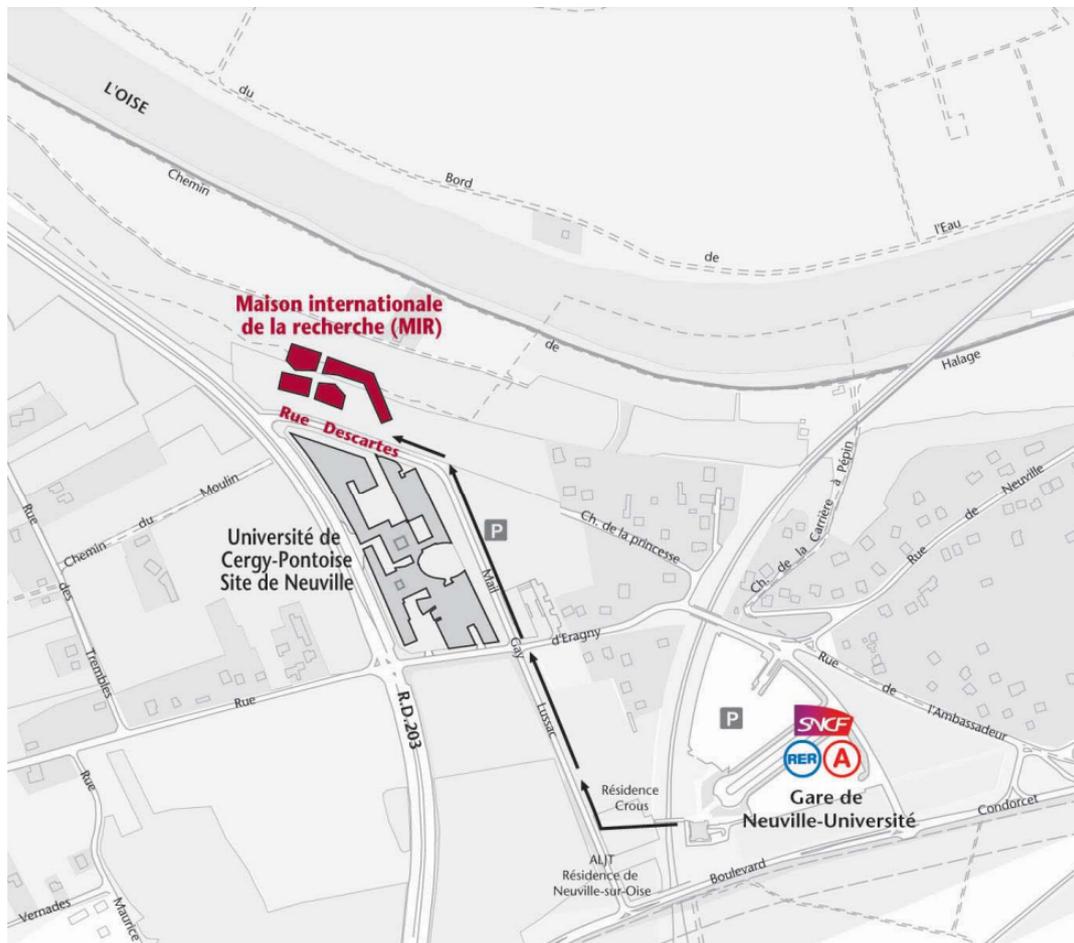
This thesis proposes an original multi-scale methodology, combining experimental and numerical analyses, to identify and understand the damage processes involved in two typical limestones of the heritage masonry (Savonnières and Saint Maximin) suffering sodium sulfates weathering. At the mesoscopic scale (cm), the fluids transfert properties of the samples are studied by permeability and capillary imbibition experiments. The dynamic mechanical properties (Young modulus and Poisson coefficient) are followed by elastic waves propagation experiments. At the microscopic scale (μm - nm), the mineralogical composition and the physical properties (topography, Young modulus, hardness) of the samples are evaluated by the coupling of Raman spectroscopy and atomic force microscopy. Numerical modelling based on LSM (Lattice Spring Model) allow the extrapolation of the experimental results, obtained at the microscale, in a 3D space.

A Young modulus and hardness decrease of the calcareous carbonated phases is observed during the weathering cycles suggesting mechanical damage processes. This decrease is more important along the cleavage plans which would be weakness zones where micro-cracking would occurs. The numerical models obtained seem to account of this phenomenon. Gypsum crystallization is observed within the samples micropores. Dissolution patterns of the calcite are also identified in the same zones suggesting a chemical weathering by dissolution. Combined processes, mechanicals and chemicals, could be thus responsible of the stones degradation by sodium sulfates.

Key words : Building Heritage, Damage, Sodium sulfate, Multi-scale, AFM, Raman, LSM

Plan d'accès Maison Internationale de la Recherche (MIR) de CY Cergy Paris Université

1 rue Descartes 95000 Neuville-sur-Oise



Accès en train

Venir en RER :

Prendre RER A direction Cergy-Le-Haut, arrêt Neuville-Université, sortie " Université".

Venir en train :

Depuis la gare Saint-Lazare à Paris, prendre un train pour Cergy-Le-Haut (ligne L), arrêt NeuvilleUniversité, sortie "1- Mail Gay Lussac".

Accès en voiture

Depuis Paris :

À Porte Maillot, direction La Défense. Sur A86, suivre Cergy-Pontoise. Sur A15, direction Cergy-Pontoise, Sortie 7. Prendre N184 direction Versailles/Jouy-le Moutier/Neuville-sur-Oise.

Depuis Versailles :

Prendre N184, direction Beauvais jusqu'à Conflans-Sainte-Honorine, puis direction Neuville-sur-Oise.