

31 mars 2025

Sujet de thèse :

**Modélisation numérique des interactions entre les tunnels anciens en maçonnerie et les mouvements lents des versants : Application à l'étude des pathologies et à la conception des travaux de maintenance des ouvrages**

**Contexte**

Le réseau ferré national en France compte plus de 1500 tunnels d'une longueur total d'environ 600 km. Un grand nombre de ces tunnels anciens, dont les premiers construits datent de 1830, est ancien (moyenne d'âge 137 ans). Les tunnels anciens sont souvent des ouvrages en maçonnerie, construits sans tenir compte des effets à long terme des déformations du sol, et particulièrement vulnérables aux évolutions lentes du milieu environnant. En effet, le fluage des formations argileuses profondes et les mouvements progressifs des versants instables peuvent engendrer des contraintes supplémentaires sur ces structures, compromettant leur stabilité et leur durabilité. Un bon nombre des tunnels en maçonneries implantés en situation de versant a développé, au cours du temps, des pathologies caractéristiques liées à cette situation particulière. Les désordres sont particulièrement observés dans les structures des tunnels peu profonds et au niveau des entrées en terre des tunnels dans les versants. La compréhension des causes et l'évolution de ces pathologies est cruciale pour définir des stratégies de réparation efficaces et durables.

**Verrous scientifiques**

La modélisation numérique des désordres des tunnels en maçonnerie qui résultent de l'interaction entre le massif de sol et la structure du tunnel pose un défi majeur en raison des différences de comportement entre ces deux milieux :

1. Le sol est un milieu continu soumis au fluage ou aux déformations différées plus ou moins importantes suivant la nature des matériaux (argiles, marnes, etc.) Sa modélisation nécessite des approches en mécanique des milieux continus. De plus, par leur nature même, les versants naturels sont des milieux fortement hétérogène et caractérisé par un comportement non linéaire et anisotropes.
2. Les ouvrages en maçonnerie sont des milieux discontinus, où les joints de mortier constituent des plans de faiblesse qui contrôlent en grande partie le comportement mécanique. Les désordres observés sur les ouvrages en maçonnerie se produisent principalement au niveau des joints.

L'approche la plus couramment utilisé pour modéliser les ouvrages en maçonnerie s'est reposé sur des méthodes d'éléments discrets (DEM) (Dimnet et Hemmati, 2016). Mais celles-ci sont difficiles à coupler avec la mécanique des milieux continus. De ce fait, les

---

navier-lab.fr

études qui ont intégré les sols dans l'analyse de ces ouvrages ont dû remplacer la partie maçonnerie par un milieu continu (Lionel Causse 2015, Omar Moreno Regan 2016). Or les modèles de milieux continus équivalents reposent sur les méthodes de d'homogénéisation et de changement d'échelles qui supposent une séparation des échelles des micro (hétérogénéités, blocs de maçonnerie) et macro (milieu équivalent, ouvrage). Or dans un élément en maçonnerie les conditions de cette séparation ne sont pas toujours bien remplies : l'épaisseur de la voûte en maçonnerie qui est l'élément clé de l'ouvrage peut ne comporter que quelques rangées de blocs. Une approche en milieu continu homogénéisé ne peut donc pas représenter en toute fidélité le rôle très localisé que jouent les joints de maçonnerie. Les approches fondées sur les méthodes d'homogénéisations, même très sophistiquées et intégrant les phénomènes d'endommagement, ne semblent pas avoir été beaucoup utilisées par les ingénieurs de bureaux d'études pour l'étude des pathologies des cas réels d'ouvrages.

### **Objectifs et méthodologie :**

Cette thèse vise à développer une approche de modélisation hybride, en couplant les modèles continus de sols viscoplastiques et les modèles discrets de maçonnerie. On utilise à cet effet la méthode des éléments finis enrichis par des éléments joints (JFEM) qui permet d'englober les deux types de matériaux, continu et discontinu, au sein d'un même modèle numérique. Cette méthode utilisée depuis longtemps pour l'étude des roches fracturées (Pouya et Ghoreychi 2001, Chalhoub 2006) a été utilisée plus récemment avec succès pour les études des ouvrages en maçonnerie (Chalhoub et Pouya 2016, Chalhoub 2020).

L'objectif est de développer une approche de modélisation numérique avancée pour simuler les interactions entre les tunnels en maçonnerie et les déformations différées des sols. Il s'agit en particulier de :

1. Caractériser les effets du fluage et des mouvements de versant sur la stabilité des tunnels anciens en maçonnerie à partir de données de terrain et d'expériences en laboratoire.
2. Mettre en œuvre des modèles numériques couplant mécanique des sols et des structures, en intégrant les comportements visco-plastiques des sols et les particularités des maçonneries anciennes avec la modélisation explicite des joints de maçonnerie avec un comportement non linéaire (élastoplasticité, fluage et endommagement progressif).
3. Valider et affiner les modèles en les confrontant à des cas réels de tunnels affectés par ces phénomènes, en exploitant des données d'observations qu'on trouve dans la littérature, en particulier les thèses citées ci-dessus, ou obtenus auprès d'organismes en charge de la maintenance des ouvrages (SNCF, RATP).
4. Proposer des stratégies d'intervention et de renforcement adaptées, permettant d'anticiper les risques et d'optimiser la maintenance des infrastructures souterraines patrimoniales.

Les résultats de cette recherche permettront Une meilleure compréhension des effets différés du sol sur la stabilité des tunnels anciens, et le développement d'outils de simulation plus réalistes, intégrant à la fois les phénomènes de fluage et la nature discontinue des ouvrages en maçonnerie.

Les résultats attendus contribueront à une meilleure prise en compte des effets différés du sol dans la surveillance des tunnels anciens en maçonnerie et améliorant la durabilité des travaux de réparation et maintenance face aux évolutions du terrain environnant.

La thèse se déroulera au Laboratoire Navier sous le direction d'Amade Pouya (Navier) et de Sahar Hemmati (SRO).

Contact : **Amade Pouya**, [amade.pouya@enpc.fr](mailto:amade.pouya@enpc.fr)  
**Sahar Hemmati**, [sahar.hemmati@univ-eiffel.fr](mailto:sahar.hemmati@univ-eiffel.fr)

#### **Références :**

Hemmati S., Dimnet E. (2016) Modélisation numérique de la réponse dynamique d'un mur en maçonnerie sous chargements sismiques. Journée nationale maçonnerie, Mars 2016

Dimnet E., Hemmati S. (2016) Numerical modelling of a masonry wall under impact loads. Journée nationale maçonnerie, Mars 2016

Lionel Causse (2015). Analyse et modélisation des interactions géomécaniques entre tunnels et versants instables. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2015.

Omar Moreno Regan (2016). Étude du comportement des tunnels en maçonnerie du métro Parisien. Thèse de doctorat Université Paris Est (Ifsttar), 2016.

Michel Chalhoub, Amade Pouya (2016). Modélisation du renforcement des ouvrages en maçonnerie par la méthode des éléments finis : le cas du collège du Notre Dame de Nazareth -Byrouth. Journées Nationales Maçonnerie. Ifsttar, Marne-le-Vallée, 2016.

Michel Chalhoub (2020). Anisotropic nonlinear homogenized constitutive model of masonry walls. Master thesis SAHC, University of Minho, Guimaraes, Portugal, 2020.

Amade Pouya, Mehdi Ghoreychi (2001) "Determination of rock mass strength properties by homogenisation", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 25, (2001), 1285-1303.

Michel Chalhoub. (2006) : Apports des méthodes d'homogénéisation numériques à la classification des massifs rocheux fracturés. Thèse de doctorat à l'école nationale supérieure des mines de paris, p.226.