
Caractérisation de l'état de la maçonnerie d'un ouvrage enterré

D. Llanca^{1*}, P. Breul¹, A. Talon¹, C. Bacconnet¹, Y. Haddani²

¹ Clermont Université, Laboratoire de Mécaniques et Ingénieries, Polytech' Clermont-Ferrand – 63174 Aubière Cedex.

² Sol Solution, bureau d'études géotechniques ZA des portes de RIOM - BP 178 63204 Riom Cédex.

* daniel.llanca@polytech.univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ. Les tunnels anciens, ouvrages le plus souvent maçonnés, présentent des désordres pour la plupart liés à leur évolution depuis leur mise en service et conditionnés par divers facteurs. On possède en général très peu d'informations sur ces ouvrages, ce qui rend délicat l'évaluation de leur état global et de leur évolution. Les gestionnaires des ouvrages doivent optimiser la maintenance sur la base d'un diagnostic qui doit permettre d'apporter une caractérisation des éléments constitutifs de ces ouvrages (structure, contact et terrain encaissant) et de la variabilité de leurs propriétés. Dans ce but, on peut utiliser les observations régulières réalisées sur ces ouvrages et des méthodes d'auscultation locales et globales. Dans le cadre du projet ANR MéDiTOSS (Méthodologie de Diagnostic des tunnels et Ouvrages Souterrains en Service), on cherche à développer une nouvelle méthodologie de diagnostic de la structure de ces ouvrages répondant aux contraintes d'exploitation et de sécurité, afin de fournir au gestionnaire des indicateurs caractérisant l'état des maçonneries constituant ses ouvrages.

ABSTRACT The old tunnels, usually masonry structures, present for most disorders related to their evolution since their conception and conditioned by various factors. It generally has very poor information about them, which makes it difficult to assess their overall status and trends. Moreover, managers must optimize maintenance works on the basis of a diagnosis that should help provide a characterization of components of these structures (structure, contact and surrounding ground) and the variability of their properties. To this end, we can use the regular observations performed on these structures and methods of auscultation local and global. On this way, we can use the regular observations performed on these structures and methods of auscultation local and global. Under the ANR MéDiTOSS (Methodology of Diagnosis of tunnels and Underground Structures in Service) is seeking to develop a new methodology for diagnosis of the structure of these works meet the performance requirements and safety in order to provide the manager indicators characterizing the state of the masonry constituting his works.

MOTS-CLÉS : maçonnés, désordres, caractérisation, interface, maintenance, diagnostic.

KEY WORDS : masonry, disorders, characterization, interface, maintenance, diagnosis.

Introduction

Les ouvrages souterrains constituent en France un patrimoine de plus en plus important et qui vieillit. Ces ouvrages peuvent présenter des désordres liés, pour la plupart, à leur évolution depuis leur mise en service, et conditionnés par divers facteurs tels que leur âge, la qualité des matériaux, la méthode de construction, le terrain encaissant, les sollicitations subies, etc.

Or la gestion des ouvrages enterrés, dont le but est d'optimiser les politiques de maintenance et ainsi maintenir le patrimoine existant dans un bon état de service, fait apparaître un réel besoin de qualification de ces ouvrages. Il est nécessaire que les gestionnaires puissent améliorer leurs techniques de diagnostic et disposer d'outils leur permettant de mieux estimer l'état de leurs ouvrages. Mais les méthodes dont ils disposent à l'heure actuelle sont soit insuffisantes pour apporter une information quantitative de qualité, soit mal adaptées aux contraintes de ces ouvrages.

En effet, ces dernières années, un nombre important d'outils et de méthodes non intrusifs permettant d'évaluer de manière globale ces ouvrages ont été développés et testés (AFTES, 2008), (RERAU, 2005). Mais ces méthodes ne permettent pas souvent de dissocier et d'évaluer l'état de chaque élément constitutif de l'ouvrage (structure, terrain encaissant et leur interface de contact). Il est donc nécessaire de développer une méthode de diagnostic permettant de fournir les caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure ainsi que son état de dégradation. L'établissement d'un diagnostic de ces ouvrages doit permettre d'apporter une caractérisation de la structure et de la variabilité de ses propriétés. Dans le cadre du projet ANR MéDiTOSS (Méthodologie de Diagnostic des tunnels et Ouvrages Souterrains en Service), on cherche à développer une nouvelle méthodologie de diagnostic de la structure de ces ouvrages répondant aux contraintes d'exploitation et de sécurité, afin de fournir au gestionnaire des indicateurs caractérisant l'état des maçonneries constituant ses ouvrages.

Nous présentons dans cet article, une étude menée en vue de caractériser et de proposer une classification de l'état des maçonneries d'ouvrages du métro parisien. Cette étude est basée d'une part sur l'analyse visuelle de carottes extraites sur différents tronçons et d'autre part sur la caractérisation des propriétés mécaniques d'échantillons taillés dans ces carottes.

Par ailleurs, une étude basée sur l'utilisation de la géoendoscopie pour tenter de retrouver l'état de ces carottes à partir d'analyses d'images est présentée. Des travaux ont déjà été menés par le LaMI et Sol Solution sur l'étude de l'état de la structure d'ouvrages enterrés via la géoendoscopie (Haddani, 2002). Ces études de faisabilité ont mis en évidence l'adéquation de l'utilisation de ces outils avec les contraintes des ouvrages enterrés en service. Mais une phase d'apprentissage correspondant à l'établissement d'une banque de données permettra d'améliorer l'interprétation des résultats et la caractérisation des matériaux. L'étude comparative de cette technique avec les essais de résistance classiques réalisés est effectuée et

discutée. A terme, le couplage de ces analyses locales, à l'échelle des tronçons, avec les résultats d'essais géophysiques sera réalisé en vue d'obtenir une cotation et une hiérarchisation des différents tronçons auscultés.

1. Méthodologie de diagnostic

Les méthodes de diagnostic des maçonneries classiquement utilisées peuvent être divisées en deux parties. Une première phase basée uniquement sur une inspection visuelle de l'ouvrage permet de relever les zones où l'ouvrage présente des anomalies. La deuxième phase est composée de campagnes de reconnaissance basées sur des auscultations de sondages et de forages, qui permettent le prélèvement d'échantillons à partir de carottages et la réalisation d'essais Lugeon et/ou d'injections. Cette analyse permet de déterminer la nature des matériaux constitutifs ainsi que l'épaisseur de la paroi. L'essai Lugeon ainsi que la quantification des volumes injectés permet de quantifier le débit de fuite donc l'état de fissuration de la structure.

Il est nécessaire d'améliorer la démarche traditionnelle de reconnaissance en vue d'obtenir un diagnostic plus quantitatif et moins subjectif. En effet, la démarche actuelle étant basée sur l'analyse visuelle, l'expertise et les critères de l'opérateur jouent un rôle majeur sur les résultats du diagnostic émis. Par ailleurs, le contrôle des volumes des injections ne permet pas d'identifier les zones qui ont été effectivement régénérées.

La méthodologie proposée s'appuie sur le couplage d'essais géophysiques (impédance mécanique et radar) et de sondages ponctuels par géoendoscopie (Haddani 2002) dans le but de fournir une évaluation quantitative de l'état de la maçonnerie en passant d'une analyse localisée (sondage) à une analyse par tronçon.

1.1. Les outils et la technique de diagnostic utilisée

Le test d'impédance (Haddani et al. 2010)

La méthode de l'impédance mécanique est une technique basée sur l'analyse des caractéristiques de propagation dans un milieu d'une onde de célérité C . Un choc est appliqué au moyen d'un marteau équipé d'un capteur de force sur l'élément à tester. Et on mesure les paramètres suivants :

- la vitesse de l'onde (V en m/s) ainsi produite à l'aide d'un récepteur (géophone) placé à proximité de l'impact,
- la force (F en N) appliquée par le marteau à la structure au niveau du point d'impact.

Le capteur de force et le géophone sont reliés à une centrale d'acquisition qui permet le traitement, l'enregistrement et la visualisation du signal.

Cette méthode rapide permet d'obtenir deux paramètres à partir du signal traité :

- la pente de mobilité, correspond à la pente de la courbe d'admittance entre 100 et 800 Hz,
- l'amplitude A, ou mobilité, caractérise l'aptitude d'un point d'une structure à se déplacer sous l'action d'une force. Cette valeur correspond à l'amplitude moyenne de la courbe d'admittance entre 100 et 1000 Hz,
- un troisième paramètre, la raideur peut être déterminée comme la pente à l'origine de la courbe de mobilité.

Le géoradar

La méthode de géoradar opère avec l'étude de la propagation d'ondes électromagnétiques. Elle s'appuie sur l'étude de la réflexion des ondes du au changement de milieu lors de la présence d'une interface comme la limite entre la structure et l'encaissant dans le cas des ouvrages souterrains par exemple.

Le signal récupéré est utilisé pour générer un radargramme qui représente la somme des impulsions réfléchies.

Les principales fréquences d'antenne se trouvent entre 80 et 1000MHz. L'incrément de la fréquence est directement en relation avec la profondeur de pénétration de l'outil.

La géoendoscopie

La géoendoscopie (cf. Figure 1) consiste à introduire un endoscope de 8 mm de diamètre dans la cavité préalablement réalisée suite à un forage (Haddani et al. 2005). Il permet d'enregistrer un film continu ou des images de toute la cavité à partir desquelles une analyse est ensuite menée. Les images obtenues font une surface de 5 mm² et leur grossissement est de l'ordre de 10. Ces images sont ensuite analysées de manière automatique afin de caractériser les différents matériaux constitutifs de l'ouvrage, de repérer des anomalies ou défauts ponctuels tels que les fissures ou vides dans le revêtement, son épaisseur totale et l'état de contact sol/structure ainsi que la composition des terrains environnants.

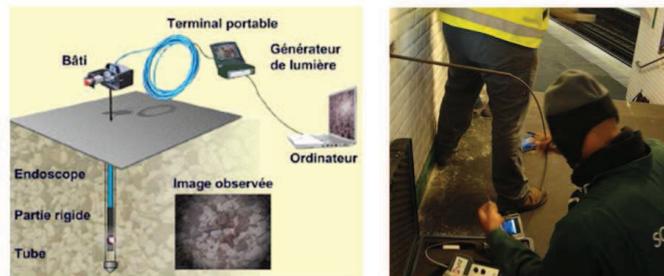


Figure 1 - Schéma de principe et photographie in situ d'un essai géoendoscopique

La méthodologie de diagnostic proposée ici, repose sur l'utilisation couplée de ces 3 outils en vue d'obtenir une estimation de l'état de dégradation de la maçonnerie. L'essai géo endoscopique a pour objectif de fournir la description de l'état local de la maçonnerie, telle que décrite dans la suite de cet article. Puis le couplage de cette information avec les résultats obtenus par les méthodes géophysiques devra permettre d'obtenir une image générale de l'état de dégradation d'une portion d'ouvrage. Cette seconde étape n'est pas présentée dans cet article et fait encore l'objet de travaux de recherche.

2. Caractérisation de l'état de la maçonnerie

L'objectif ici serait de pouvoir remplacer la méthodologie traditionnelle de qualification de la maçonnerie (analyse visuelle des carottes + essais d'injection) par une analyse basée sur le traitement des images géoendoscopiques dans des forages de tailles réduites 20 mm. La méthodologie traditionnelle nécessite un temps d'investigation important, des forages de diamètre de l'ordre de 60 mm, et une intervention lourde avec des moyens coûteux. L'analyse basée sur le traitement des images géoendoscopiques permettront d'évaluer l'état de la maçonnerie, la présence des anomalies et finalement de repérer l'extrados de l'ouvrage et le niveau de contact entre celle-ci et le terrain encaissant.

Pour pouvoir caler et valider cette technique, nous avons tout d'abord établi une étude de l'état de dégradation de la maçonnerie à partir de l'analyse visuelle de carottes et d'essais de laboratoire effectués sur des échantillons de carottes, puis nous avons tenté de caler des paramètres d'analyses d'images permettant de retrouver cet état à partir des images acquises à l'endoscope.

2.1. Caractérisation en laboratoire

Les échantillons utilisés pour cette étude proviennent des stations Pasteur et Champs de Mars du métro de Paris. Les carottages ont été classés selon leur état générale d'altération de la carotte (sur le critère du RQD) et ensuite différents essais ont été réalisés sur des échantillons extraits de ces carottes en vue de qualifier l'état des portions les « plus saines » des maçonneries et de connaître les paramètres physiques des matériaux constitutifs. L'objectif de cette analyse à 2 niveaux (au niveau de l'état général de la carotte et des échantillons constituant la carotte) est de voir si une maçonnerie dégradée est le résultat d'une dégradation globale (fissuration, désagrégation) et/ou d'une dégradation locale du matériau la constituant.

Description de la procédure expérimentale

A partir des carottages effectués en différents endroits de l'ouvrage (pied droit, naissance, clé de voûte) selon schéma de la Figure 2, des échantillons ont été

prélèves pour la réalisation des essais physiques, notamment essais de compression axiale, et traction indirecte (brésilien), ultrasoniques et d'essais de densité.

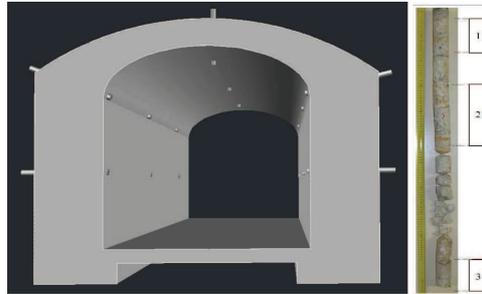


Figure 2 – Schéma d'implantation des sondages dans les couloirs d'accès, station Pasteur

Du fait de l'historique des ouvrages et des modes constructifs employés, la composition des carottes est assez variable. On trouve des mortiers, des bétons et plusieurs types de roches principalement d'origine calcaire (meulière, calcaire grossier).

Un total de 51 carottages ont été étudiés (environ 130 éprouvettes), Pour les essais de compression uniaxiale, un total de 51 échantillons ont été testés, dont 21 instrumentés avec des jauges extenso métriques. Les essais ont été effectués à une vitesse de 0,5 MPa/s.

Résultats des essais mécaniques

A partir des essais réalisés, plusieurs paramètres ont été analysés : résistance à la compression (R_c), Module d'Young (E), coefficient de Poisson (ν) et déformation à la rupture (ϵ).

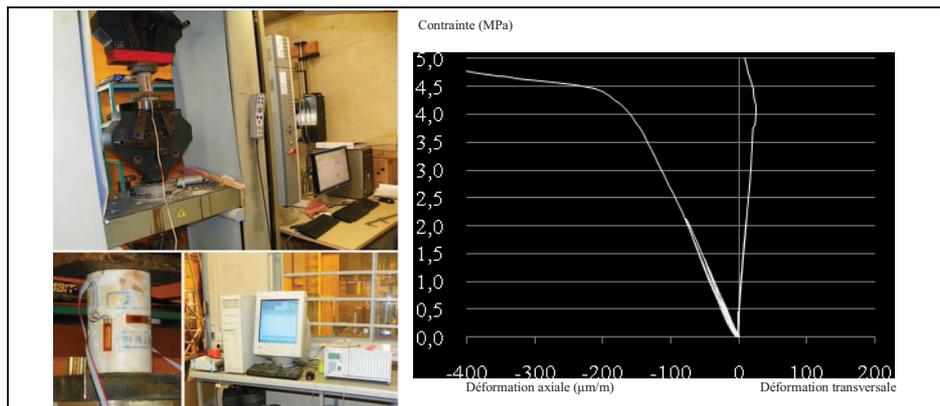


Figure 3 – Réalisation des essais et courbe typique d'un essai de compression axiale

Les valeurs de résistance à la compression et de modules obtenues sont très variables (tableau 1) :

	R _c (MPa)		f _{ct} (MPa) brésilien		E (GPa)	
	moyenne	Ecart-type	moyenne	Ecart-type	moyenne	Ecart-type
béton	22	17	4.0	1.8	24	16
mortier/roche	10	4.5	2.4	1.4	23	14
calcaire	43	19	11.42	4.9	78.5	47
meulière	23	18	6.4	2.8	52	9.8

Tableau 1 – Bilan des intervalles de valeur obtenus pour les paramètres mécaniques en fonction du type de matériau constituant l'échantillon.

Du fait de la grande variabilité des matériaux et des différents états de dégradation (tableau 2), on trouve une forte variabilité des valeurs pour chaque propriété mesurée. En général, on retrouve des valeurs plus importantes pour les échantillons de roches à l'exception de la meulière dégradée. Les échantillons de béton homogènes ont des valeurs de résistance plus importantes, tandis que les échantillons hétérogènes (mélanges de mortiers et de roches en différents états d'altération) ont des valeurs plus faibles et variables.

	RQD carotte	Classement de l'état général	
1	R.Q.D. < 25 %	très mauvais	MAUVAIS
2	25 % < R.Q.D. < 50 %	mauvais	
3	50 % < R.Q.D. < 75 %	moyen	MOYEN
4	75 % < R.Q.D. < 90 %	bon	BON
5	90 % < R.Q.D. < 100 %	excellent	

Tableau 2 – Critères de RQD utilisées pour le classement visuel.

Le classement a montré que la plupart des carottages étudiés sont dégradés, avec 57% des échantillons qui ont un RQD qui indique un état mauvais, 35% classés en un état moyen d'altération et 9% en bon état.

De même, les parties d'échantillons et de carottes ayant les caractéristiques les plus dégradées se situent dans le dernier tiers des sondages (zone de contact avec le terrain). Cette contrainte a conditionné et limité l'étude des propriétés dans cette partie du revêtement

2.2 Caractérisation en place à partir des essais géoendoscopiques

Les essais réalisés

Une série d'essais géoendoscopiques a été effectuée dans les stations du métro de Paris, Pasteur (11 sur sondages et un 1 dans un forage) et Champs de Mars (3 sondages et 7 forages), afin d'appliquer la technique sur site. Par ailleurs, des essais géoendoscopiques ont été réalisés en laboratoire, sur une trentaine de carottes provenant des stations mentionnées précédemment, dans le but d'effectuer un calage des paramètres d'images permettant d'identifier automatiquement les dégradations de la maçonnerie. Une étude de paramétrage des propriétés endoscopiques des différents matériaux en présence, a permis de déterminer les seuils discriminants permettant le repérage des anomalies (fissures, zones dégradées).

Paramètres d'analyse d'images

L'étude paramétrique cherche à identifier les critères de détection automatique des différentes anomalies dans les matériaux analysés (vides, fissures, dégradations). Les paramètres analysés sont les suivants :

- paramètres statistiques et de texture : moment de Fourier M3, écart-type, coefficient de variation.
- paramètres de la couleur : teinte, saturation, intensité, niveau de rouge, niveau de vert et de bleu.

L'analyse d'images a été comparée avec l'analyse de l'état général de la carotte (visuelle) afin d'évaluer sa performance et sa robustesse face aux différents matériaux mélangés dans les carottes.

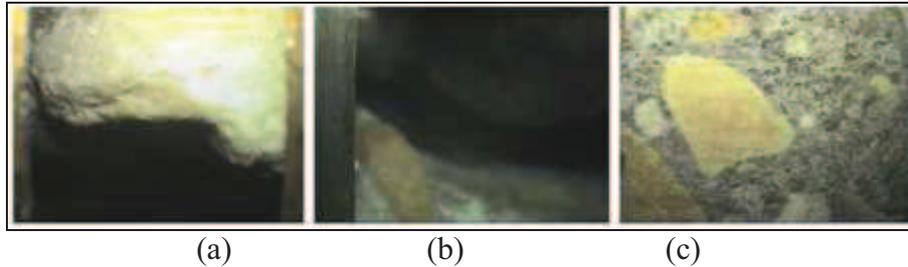


Figure 4 – Images issues d'une analyse géoendoscopique, zones endommagées (a) et (b), béton sain (c)

Caractérisation de l'état de la maçonnerie d'un ouvrage enterré

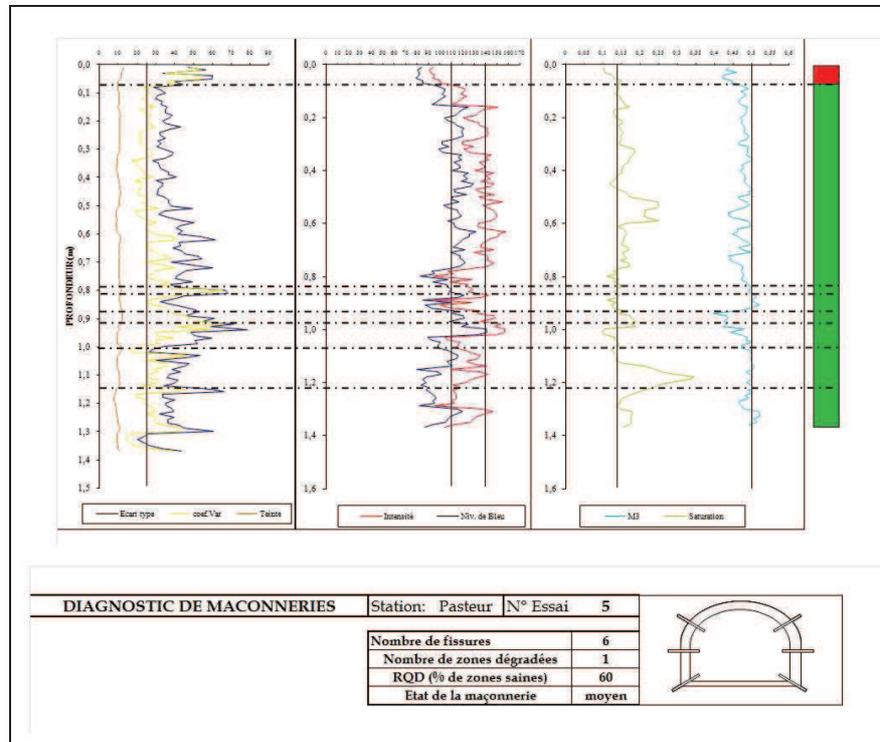


Figure 5 – Résultat d'une analyse géoscopique

Les analyses ont permis d'obtenir une correspondance dans environ 75% des cas pour la détection des fissures, des zones dégradées et des vides.

Les résultats montrent que la partie la plus endommagée et désagrégée des carottages se situe dans la zone de contact entre la structure et le terrain encaissant.

L'utilisation des forages permet de réduire les temps d'auscultation, donc de réaliser un nombre plus importants d'essais en altérant de façon minimale la structure. L'analyse automatique des images minimise le temps d'analyse et permet d'éviter les interprétations subjectives de l'opérateur (seuils prédéfinis). La géoscopie permet donc de retrouver dans une majorité de cas l'état local d'altération de la maçonnerie. Par ailleurs, elle permet aussi d'évaluer l'état du contact entre le terrain et la structure.

Conclusions et perspectives

L'étude présentée tente de caractériser l'état de dégradation d'une maçonnerie d'ouvrage enterré. L'estimation de l'état général de dégradation d'un ouvrage est importante pour permettre à ces gestionnaires de mener une politique de maintenance optimisée. Cette estimation doit passer par une quantification de l'état de dégradation de la maçonnerie au niveau local et global de l'ouvrage. Une étude sur les caractéristiques mécaniques d'échantillons extraits de carottes montre que ces caractéristiques sont globalement de bonnes qualités pour la majorité des matériaux composant l'échantillon, mais que l'on peut avoir une variabilité assez importante du fait de la variabilité des matériaux rencontrés. La meulière montre par contre des caractéristiques qui sont sensibles à son état de dégradation. Il apparaît également que le comportement des échantillons ne représente pas le comportement global de la structure mais que celle-ci est bien mieux traduite par l'état de dégradation des carottes (RQD notamment). L'analyse géoendoscopique permet d'obtenir cet état de dégradation de façon automatique avec une bonne concordance avec les analyses visuelles classiques. Cette technique permet de mener une analyse de l'interface entre la structure et le terrain encaissant (contact).

A l'avenir un travail complémentaire est nécessaire en vue d'améliorer encore la robustesse de l'analyse endoscopique et de reconnaître automatiquement les zones de meulière dégradées. De même un travail important est à réaliser pour passer de la caractérisation de l'état local de la maçonnerie à une caractérisation globale d'un tronçon d'ouvrage par couplage avec les essais géophysiques. Remerciements: Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet MéDiTOSS (appel à projet Villes Durables) bénéficiant du soutien financier de l'ANR et du ministère de la recherche.

Références

- AFTES Congrès International AFTES, *le souterrain : espace d'avenir*, Monaco, 6-8 oct. 2008.
- Haddani Y., Breul P., Gourves R., « Géoendoscopie : application au diagnostic d'ouvrages enterrés en service », Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, « *Optimisation de l'insertion des ouvrages dans le sol et le sous-sol* », Nancy, 8-10 octobre 2002.
- Haddani Y., Breul P., Gourves R., « *Diagnostic des tunnels par géoendoscopie* », Congrès International AFTES « *Les tunnels, clé d'une Europe durable* », Chambéry, 10-12 oct. 2005, pp. 561-566.
- Haddani Y. et al., « *Diagnostic d'ouvrages enterrés : Auscultation des couloirs d'accès à la station pasteur projet MéDiTOSS* », Sol Solution. fév. 2010.
- RERAU Rapport 5/6 Action n°1, *Auscultation des canalisations non visitables: encaissant et structure - Recommandations et aide au choix des outils*, 22 pages + Annexes, mars 2005.
- N. Domède, G. Pons, A. Sellier, Y. Fritih "Mechanical behaviour of ancient masonry" *Materials and Structures* (2009) 42:123–133