

Nouvelle méthodologie de diagnostic des tunnels anciens en service

New diagnosis methodology for old tunnels in service



Younés HADDANI
Sol Solution



Pierre BREUL
Institut Pascal UMR 6602



Patrick GOIRAND
RATP

► Miguel Angel BENZ, Roland GOURVES -
Sol Solution

► Daniel LLANCA, Aurélie TALON,
Claude BACCONNET - Institut Pascal UMR 6602

► Taous KAMEL, Ali LIMAM, Claire SILVANI -
Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie
Environnementale - LGCIE

Résumé

Face aux enjeux de pérennisation des ouvrages souterrains anciens, les gestionnaires de ces ouvrages ont besoin d'optimiser leur politique de maintenance. Pour cela, il est nécessaire de mieux évaluer l'état de dégradation des ouvrages et leur capacité à assurer leur fonction au cours du temps. Dans le cadre du projet ANR MéDiTOSS (Méthodologie de Diagnostic des Tunnels et Ouvrages Souterrains en Service), une nouvelle méthodologie d'auscultation complémentaire des techniques actuelles a été développée en vue de répondre à ces questions. Cette méthodologie basée sur des essais géophysiques et des sondages non traumatisants permet une évaluation quantitative de l'état de dégradation de la maçonnerie, de l'état du contact entre la structure et l'encaissant et également une caractérisation de l'encaissant et de sa variabilité. A partir des propriétés tirées de cette nouvelle méthodologie d'auscultation, une notation des ouvrages a été définie pour permettre de prioriser les interventions de maintenance. En parallèle, des travaux de modélisation, intégrant ces données ont été réalisés en vue d'étudier le comportement de ces ouvrages en intégrant les dégradations et les propriétés mesurées in situ. La mise au point et la validation de ce travail ont été réalisées sur des ouvrages réels du réseau de métro de la RATP à Paris. Cette communication présente l'ensemble de la méthodologie de diagnostic de ces ouvrages mise au point et son application sur un ouvrage réel.

Abstract

Given the issues surrounding the long-term future of ageing underground structures, agencies responsible for these structures need to optimize their maintenance policy. This involves a better evaluation of deterioration in structures and their ability to perform their function over time. As part of the French National Research Agency (ANR) project MéDiTOSS (Méthodologie de Diagnostic des Tunnels et Ouvrages Souterrains en Service, Diagnosis Methodology for Tunnels and Underground Structures in Service), a new inspection method supplementing current techniques has been developed to address these issues. Based on geophysical testing and non-aggressive probes, this methodology offers quantitative evaluation of the condition of masonry, the state of contact between the structure and the surrounding terrain, and a description of the surrounding terrain and its variability. Based on properties obtained using this new inspection method, a scoring system for structures was defined in order to prioritize maintenance works. At the same time, modelling work incorporating this data was performed in order to study the behaviour of the structures once the deterioration and properties measured on site had been integrated. Development and validation of this research was performed using actual structures on the RATP metro network in Paris. This paper presents the whole of the fully-developed diagnosis methodology for these structures, and its application to an actual structure.

1 - 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 enter-

1 - Introduction

In France, underground structures constitute an increasingly large and ageing asset. These structures may feature damage which, for the most part, relates to how they have evolved

since commissioning. This damage is dependent on a range of factors including age, quality of materials, construction methods, surrounding terrain, stresses on the structure, and so on.

The purpose of below-ground struc-

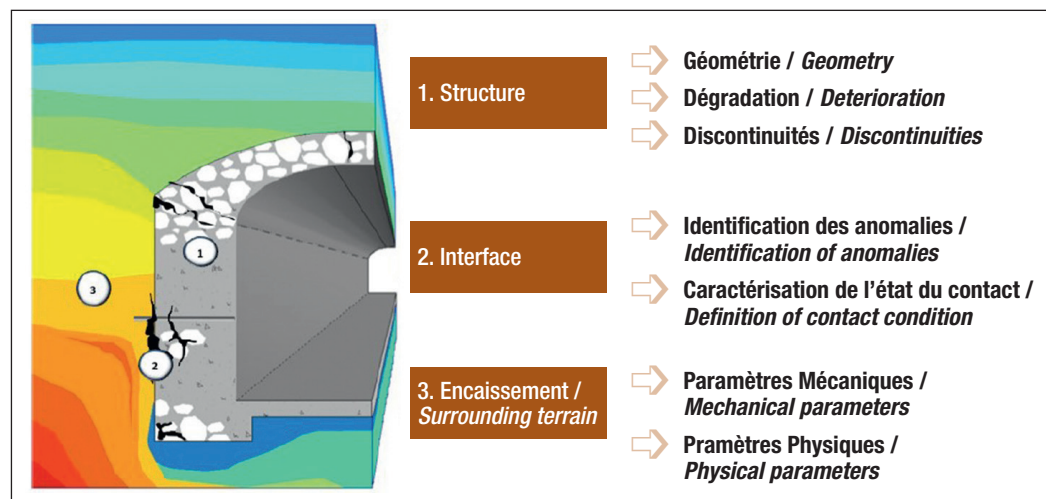


Figure 1 - Coupe d'un tunnel type RATP (accès) / Cross-section of a typical RATP access tunnel.

rés, 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 MéDi-

TOSS (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.

2 - Méthodologie et outils

2.1 - Méthodologie (fig. 2)

Les méthodes de diagnostic des maçonneries classiquement utilisées sont 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 d'injections de coulis de ciment. Cette analyse permet de déterminer la nature des matériaux constitutifs ainsi que l'épaisseur de la paroi. La quantification des volumes injectés permet de quantifier le débit de fuite donc l'état de porosité du revêtement et de fissuration de la structure.

ture management is to optimize maintenance policies and maintain existing assets in a proper service state; a real need for a proper description of these structures has emerged. Management agencies need to improve their diagnosis techniques and benefit from resources that give them a better appraisal of the condition of the structures for which they are responsible. However, the methods available to them at present are either insufficient to provide high-quality quantitative information, or ill-adapted to the particular constraints of such structures. In recent years, an increasing number of non-intrusive tools and methods providing an overall evaluation of the structures have been developed and tested (AFTES, 2008), (RERAU, 2005). However, in many cases these methods do not allow the condition of each component part of the structure (the structure itself, the surrounding terrain and their contact interface) to be distinguished and evaluated separately. There has therefore been a need to develop a diagnosis method that can identify a structure's geometric and mechanical characteristics, as well as the degree to which it has deteriorated. Establishing a diagnosis of these structures can provide a clear description of the structure and of the variability of its properties.

As part of the French National Research Agency (ANR) MéDiTOSS (Méthodologie de Diagnostic des tunnels et Ouvrages Souterrains en

Service, Diagnosis Methodology for Tunnels and Underground Structures in Service) project, attempts have been made to develop a new diagnosis methodology for the structure of these tunnels that addresses operating and safety considerations, in order to provide management agencies with indicators that clearly define the state of the masonry of which these tunnels are composed.

2 - Methodology and tools

2.1 - Methodology (fig. 2)

The methods traditionally used to diagnose masonry may be divided into two phases. The first phase is based solely on a visual inspection of the structure in order to identify areas in which there are anomalies. The second phase consists of survey campaigns based on observations from probes and drill holes, in order to take core samples and perform Lugeon and/or injection tests. This analysis makes it possible to determine the nature of the materials used and the thickness of the wall. The Lugeon test and quantitative measurement of the amount injected allows the leakage rate, and therefore the degree of cracking in the structure, to be determined.

The traditional investigation approach needs to be improved upon in order to obtain a diagnosis that is more quantitative and less subjective. Indeed,

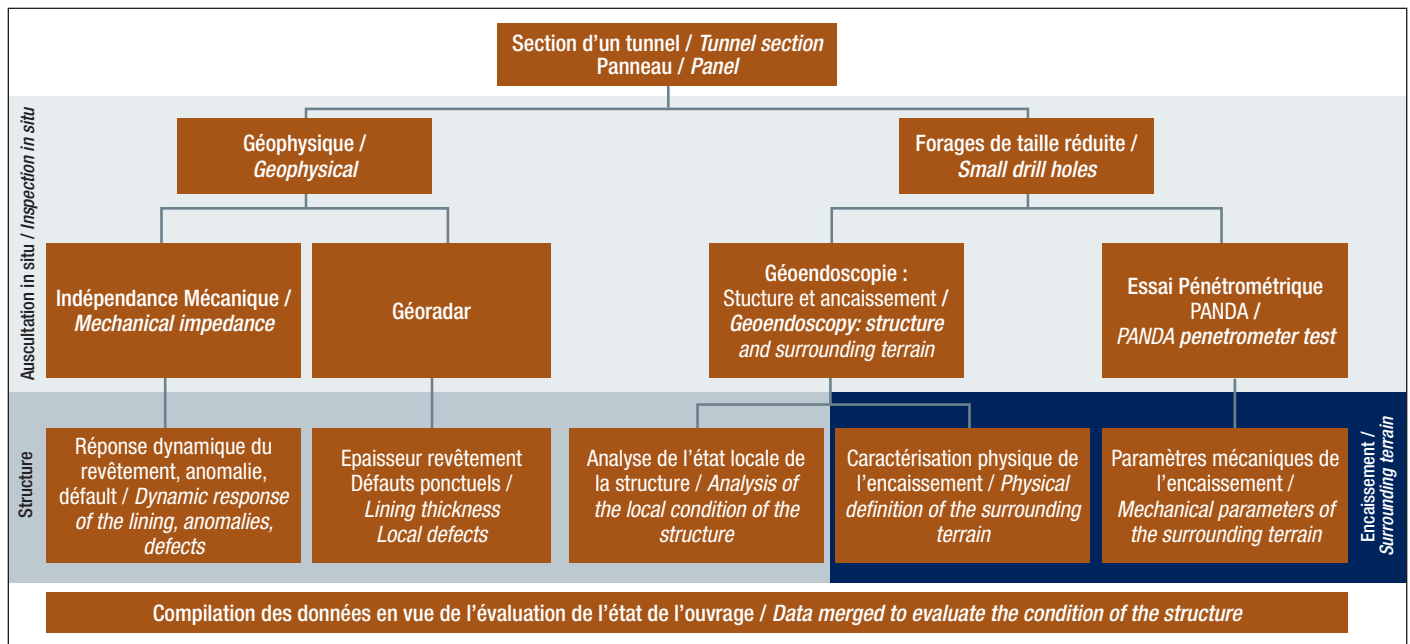


Figure 2 - Synoptique de la méthodologie / Synoptic diagram of the method.

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, les compétences et l'expérience du visiteur d'ouvrages jouent un rôle majeur sur les résultats du diagnostic émis. Par ailleurs, l'analyse des volumes injectés 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 (et PANDA® si le terrain encaissant s'y prête) 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.

nécessaire de définir la note globale du panneau. Pour cela, la démarche suivante est proposée :

since the existing approach is based on visual analysis, operator expertise and criteria exert a considerable

impedance and radar) and occasional geoendoscopy probes (plus PANDA® if the surrounding terrain allows) with

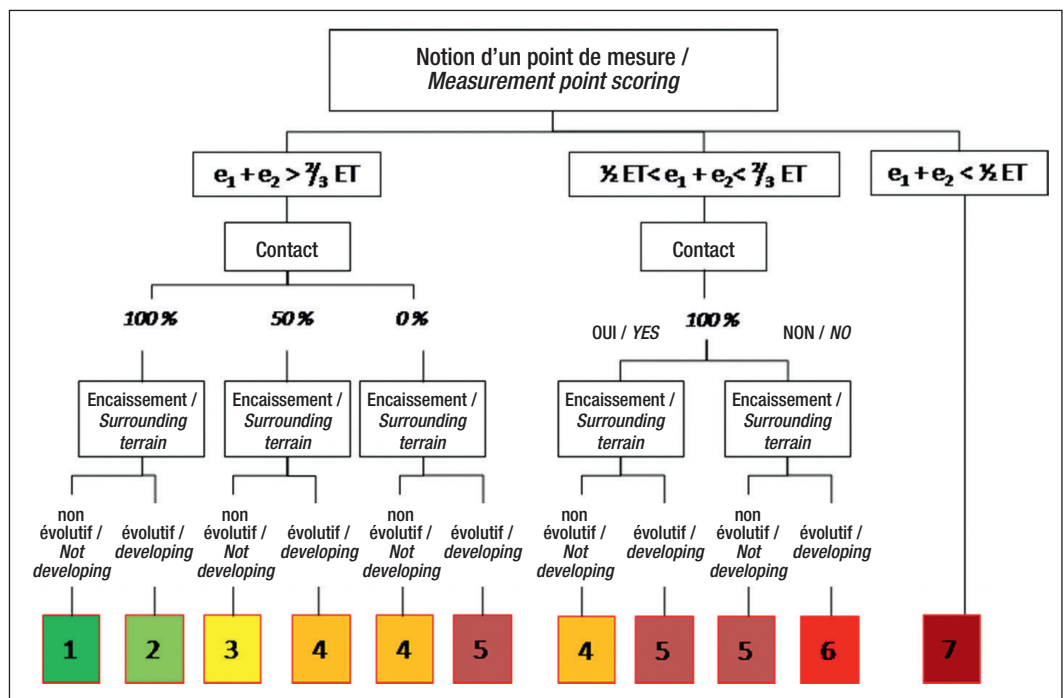


Figure 3 - Logigramme de notation d'un point de mesure / Logical diagram for scoring a measurement point.

2.2 - L'outil de notation

La figure suivante schématise le chemin logique pour l'obtention de la notation d'un point de mesure sur un panneau en prenant en compte l'analyse de la structure, du contact et de l'encaissant.

A partir des notes obtenues sur chaque point de mesure, il est

Si le pourcentage de notes « 6 » et « 7 » est supérieur à 20% du total des points de mesure, la note du panneau est de « 7 ».

Sinon la note du panneau sera la note moyenne des notes obtenues en chaque point de mesure.

influence on the resulting diagnosis. What is more, checking injection quantities does not allow areas that have been properly renovated to be identified.

The proposed method involves combining geophysical tests (mechanical

a view to providing a quantitative evaluation of the state of the masonry, transitioning from local analysis (probes) to sectional analysis.

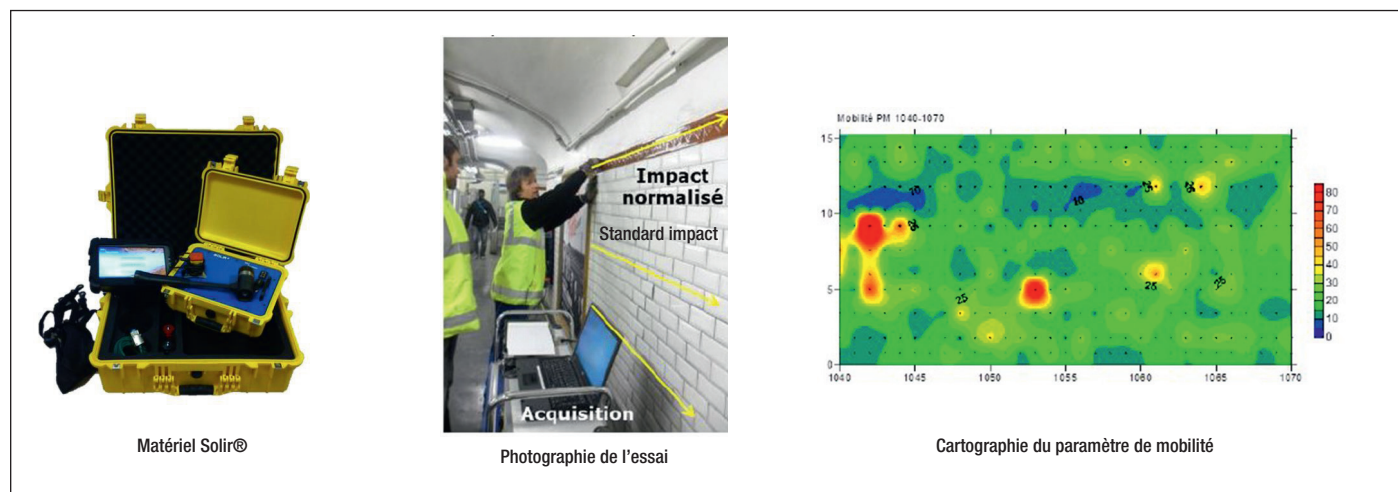


Figure 4 - Présentation des essais d'impédance mécanique / Presentation of mechanical impedance tests.

2.3 - La campagne géophysique

a. Les essais d'impédance mécanique

Technique de contrôle non destructif (CND) l'impédance permet de repérer de manière rapide les zones de variation de qualité dans une structure maçonnée ou en béton, de manière non destructive.

La méthode est basée sur l'analyse des caractéristiques de propagation dans un milieu d'une onde (basse fréquence) de célérité C . Un choc est appliqué au moyen d'un marteau équipé d'un capteur de force et on mesure à l'aide d'un géophone la vitesse de l'onde mécanique obtenue en réponse à l'impact sur l'élément testé.

- 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'ob-

tenir 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.

Dans le cadre de l'outil MEDITOSS, La principale information issue de l'impédance est l'estimation de l'épaisseur de la partie saine de maçonnerie (notée $e1$) grâce à la relation suivante (cf. LLANCA) :

$$e1 (m) = 1,64 - 0,47 * LN(PxM)$$

Où : PxM = Pente de Mobilité * Moyenne de Mobilité

$e1$ = épaisseur saine de maçonnerie ;

b. Le géoradar

Le radar géologique, technique d'auscultation non destructive, utilise la réflexion d'ondes électromagnétiques sur les interfaces du sous-sol afin d'obtenir une image des structures auscultées et permet

2.2 - Scoring tool

The following figure shows the logical pathway used to score a measurement point on a panel, taking into account analysis of the structure, the contact and the surrounding terrain.

On the basis of the scores obtained for each measurement point, an overall score for the panel must be defined. To achieve this, the following approach is suggested (see figure 3).

If the percentage of "6" and "7" scores is greater than 20% of the total for all measurement points, the panel score is "7".

In all other cases, the panel score is the mean of the scores obtained for each measurement point.

2.3 - Geophysical campaign

a. Mechanical impedance tests

Impedance tests are a form of non-destructive inspection (NDI) that is a quick and non-destructive way of identifying areas in which quality varies in masonry or concrete structures.

The method is based on the analysis of the propagation characteristics of a low-frequency wave with a phase velocity C in a given medium. An impact is applied using a hammer fitted with a force sensor; a geophone is used to

measure the velocity of the mechanical wave generated by the impact on the component under test.

- the velocity of the wave (V , m/s) produced is measured using a receiver (geophone) located close to the impact
- force (F , N) applied by the hammer to the structure at the impact point.

The force sensor and geophone are connected to a data acquisition unit which processes, records and displays the signal.

Two parameters can be obtained from the processed signal using this method:

- the mobility gradient: this corresponds to the slope of the admittance curve between 100 and 800 Hz
- amplitude (A), or mobility: this indicates the degree to which a given point of a structure moves under the action of a force. This value corresponds to the mean amplitude of the admittance curve between 100 and 1000 Hz
- a third parameter, stiffness, may be determined on the basis of the gradient at the start of the mobility curve.

The main information gained for MEDITOSS from impedance testing is the estimated thickness of the sound



Figure 5 - Présentation des essais radar / Presentation of radar tests.

de mettre en évidence la limite entre la structure et l'encaissant dans le cas des ouvrages souterrains par exemple.

Une antenne radar est déplacée sur la surface à ausculter. L'antenne émet des impulsions électromagnétiques dans le sous-sol avec une cadence régulière. Celles-ci se propagent en s'atténuant dans les matériaux du sol. A chaque interface de deux matériaux différents, une partie de l'énergie de l'impulsion est réfléchiée vers la surface. Le radar analyse le signal récupéré et reconstitue le radargramme qui représente la somme des impulsions réfléchiées.

Pour la problématique des tunnels et ouvrages souterrains, les fréquences d'antenne les plus utilisées sont 900 MHz et 400 MHz. La fréquence est inversement proportionnelle à la profondeur de pénétration de l'outil.

Dans le cadre de l'utilisation de MEDITOSS, La principale information issue du radar est l'épaisseur structurelle totale de la maçonnerie

c. Bilan de la campagne géophysique

Les essais réalisés permettent

d'apporter une cartographie continue grâce à des essais non destructifs et à haut rendement. Celle-ci permet d'optimiser le nombre et emplacement des sondages destructifs à réaliser pour caler ces méthodes et apporter des informations complémentaires.

2.4 - La campagne géotechnique

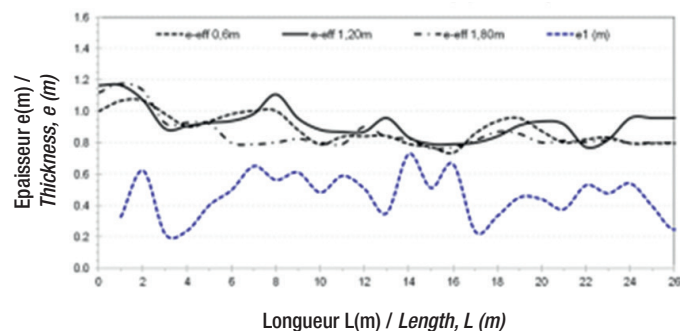
a. L'essai pénétrométrique PANDA®

L'essai de pénétration dynamique à énergie variable PANDA a été conçu pour le contrôle de compactage des tranchées (NF P 94-105) et pour la reconnaissance des sols.

L'essai Panda consiste à enfoncer par battage un train de tiges dans le sol à l'aide d'un marteau normalisé. Pour chaque coup donné des capteurs mesurent l'énergie fournie au train de tiges.

D'autres capteurs mesurent simultanément la valeur de l'enfoncement de la pointe. Le boîtier calculateur reçoit les informations et les données sont transmises à un micro-ordinateur équipé d'un logiciel de calcul.

Panneau 4 - Profil de Profondeur / Panel 4: profile of wall depth (thickness)



area of masonry on the basis of the following relationship (c.f. Llanca):

$$e1(m) = 1,64 - 0,47 * LN(PxM)$$

Where PxM = Mobility Gradient * Mobility Mean

$e1$ = sound masonry thickness

b. Georadar

Geological radar is a non-destructive inspection technique that uses the reflection of electromagnetic waves from underground interfaces to obtain an image of the structures inspected and show the boundary between the structure and the surrounding terrain, for instance in the case of underground structures.

A radar antenna is moved across the surface to be inspected. The antenna emits electromagnetic pulses below ground at regular intervals. These propagate and decrease as they pass through soil materials. At each interface between two different materials, some of the pulse energy is reflected back to the surface. The radar analyses the recovered signal and reconstitutes the radargram, showing the sum of the reflected pulses.

For tunnels and underground structures, frequencies of 900 mHz and 400 mHz are generally used. The device's penetration depth is inversely propor-

tional to the frequency used.

The main information gained from radar for MéDiTOSS is the total masonry thickness.

c. Results of the geophysical campaign

The tests performed allowed a continuous map to be established on the basis of high-performance, non-destructive tests. This allows the number and location of destructive probes to be carried out to be optimized, providing better context for these methods as well as supplementary information.

2.4 - Geotechnical campaign

a. PANDA® penetrometer test

The PANDA variable energy dynamic penetrometer test was designed to inspect trench compaction (NF P 94-105) and for soil surveying.

The Panda test involves driving a series of rods into the soil using a standardized hammer. Sensors measure the energy delivered to the series of rods for each impact.

At the same time, other sensors measure the depth to which the tip of the rod is driven. The calculation unit receives this information, and sends the data to a PC running calculation software.



Figure 6 - Présentation des essais PANDA® / Presentation of PANDA® tests.

L'essai est réalisé suite au perçage de la structure au perforateur. L'emplacement du forage est défini suite à l'analyse des résultats géophysiques (impédance mécanique et géoradar).

L'essai peut être réalisé à l'horizontal dans le terrain encaissant. Dans le cadre de MEDITOSS, L'essai panda permet de caractériser l'état de densité du terrain encaissant et grâce au couplage avec l'essai endoscopique de qualifier le caractère évolutif des matériaux constitutifs du terrain encaissant.

b. La géoendoscopie

La géo-endoscopie consiste à

introduire un endoscope de 6 mm de diamètre dans la cavité préalablement réalisée suite à un essai pénétrométrique ou tout autre essai de forage. On enregistre ensuite un film continu de toute la cavité à partir duquel une analyse automatique d'images est réalisée afin de caractériser les différentes couches du terrain. Ainsi, elle permet 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.

The test is performed after drilling a cavity drilled previously following a penetrometer test or other probe test. The probe location is defined on the basis of analysis of geophysical results (mechanical impedance and georadar).

The test may also be carried out horizontally in surrounding terrain. For MEDITOSS, the Panda test is a way of defining the density of the surrounding terrain; combined with the endoscopy test, it allows changes in the materials making up the surrounding terrain to be identified.

b. Geoendoscopy

Geoendoscopy consists in introducing an endoscope 6 mm in diameter into

a cavity drilled previously following a penetrometer test or other probe test. A continuous video of the entire cavity is recorded. This is used to conduct automatic image analysis and thus define the various layers of the terrain. This makes it possible to identify the various materials that make up the structure, locate any anomalies or occasional defects such as cracks or cavities in the lining, and establish its total thickness, the state of soil/structure contact, and the composition of surrounding terrain.

For MEDITOSS, automatic image analysis procedures have been developed to determine the degree of masonry

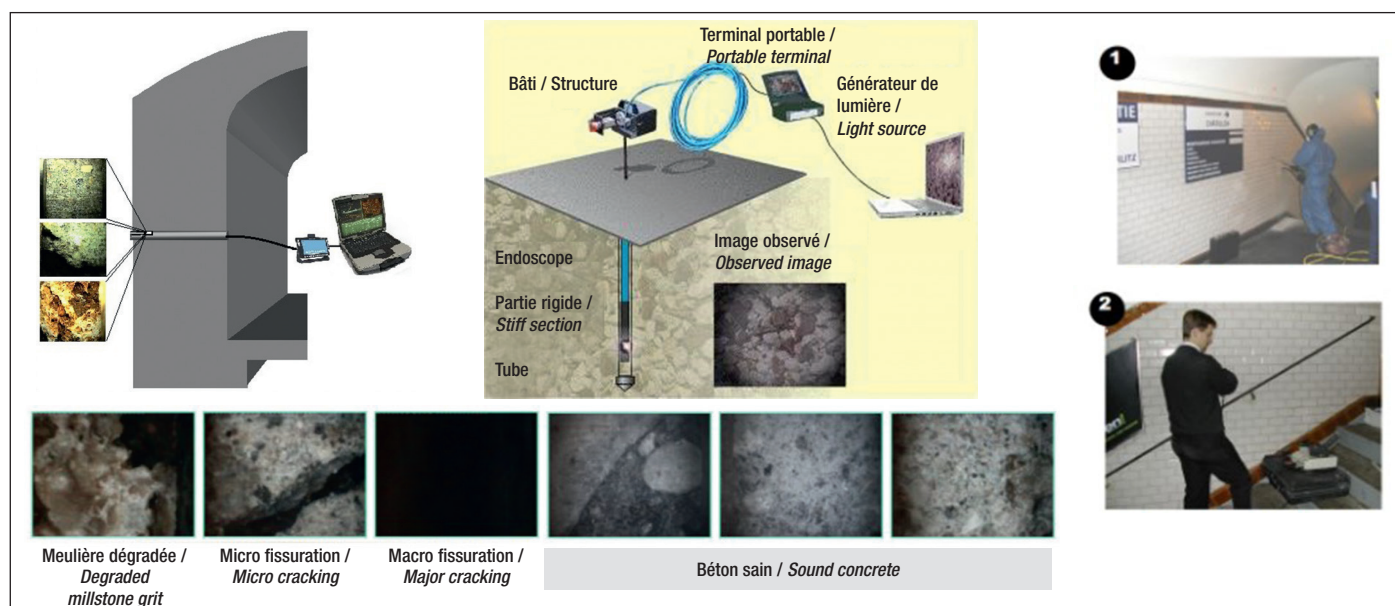


Figure 7 - Présentation des essais géoendoscopiques / Presentation of geoendoscopy tests.

Dans le cadre de MEDITOSS, des procédures d'analyses d'images automatiques ont été développées pour déterminer l'état de fracturation de la maçonnerie (équivalent RQD).

Elles permettent également de mesurer les épaisseurs de maçonneries. Pour le terrain encaissant, les caractérisations classiques d'analyse de la texture et granulométrique sont utilisées.

Le couplage de ces informations mécaniques apportées par l'essai pénétrométrique PANDA® permet de bien caractériser la nature et le caractère évolutif du terrain encaissant.

c. Couplage des données

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.

2.6 - Apports de la modélisation numérique

Afin de mettre en valeur les zones les plus problématiques dans la stabilité de l'ouvrage, et de comprendre les évolutions de l'état des contraintes et des redistributions associées, une procédure de modélisation numérique, basée sur les paramètres issus de la méthodologie de diagnostic, est utilisée. Corroborant les données issues de l'auscultation, la modélisation

numérique permet ainsi une meilleure gestion de l'ouvrage et des réparations avec le suivi des dégradations et du vieillissement dans le temps.

Le choix de la modélisation s'est porté vers une modélisation continue en 2D des tunnels et couloirs d'accès du métro parisien. Plusieurs étapes correspondant à la durée de vie de l'ouvrage ont été modélisées. L'état mécanique initial (après construction) des tunnels a d'abord été modélisé et a permis de déterminer l'état de contrainte d'équilibre initial des ouvrages et une calibration du taux de déconfinement. Les résultats obtenus qui corroborent ceux issus de l'analyse analytique disponibles de la littérature, ont permis d'identifier la liaison entre le confinement nécessaire et les paramètres les plus pertinents de l'encaissant, notamment, la cohésion, l'angle de frottement et la dilatance, en fonction de la taille et du type d'ouvrage (galerie ou tunnel).

fracturing (the equivalent to RQD).

These also allow masonry thickness to be measured. For the surrounding terrain, conventional texture and grain size analysis definitions are used.

Combining these data with the mechanical data from the PANDA® penetrometer test allows the nature and changes in the surrounding terrain to be clearly identified.

c. Combining data

The diagnosis methodology suggested here involves the combined use of these three tools to obtain an estimate of the extent to which the masonry has deteriorated. The purpose of the geoscopy test is to supply a description of masonry condition locally, as described in the rest of this article. In theory, combining this information with the results obtained by means of geophysical methods should allow an overall picture of the degree of deterioration of a given section of tunnel to be built up. This subsequent stage is not presented in this article and has not yet been the subject of research.

and to understand the evolution and redistribution of stresses, a numerical modelling process was used, based on the parameters obtained from the diagnosis methodology.

The numerical modelling, by corroborating data from inspection, allows a better management of structures and maintenance works as well as a follow up of damages due to ageing.

It was decided to apply modelling to produce continuous modelling of metro tunnels and access corridors. The initial mechanical condition of tunnels was modelled. This made it possible to determine the initial equilibrium stress state of the tunnels and calibrate the rate of stress release. The results obtained corroborate those obtained by analytical analysis in the literature and identify the relationship between the necessary confinement and the most relevant parameters for the surrounding terrain, including cohesion and the angle of friction and dilatancy, for

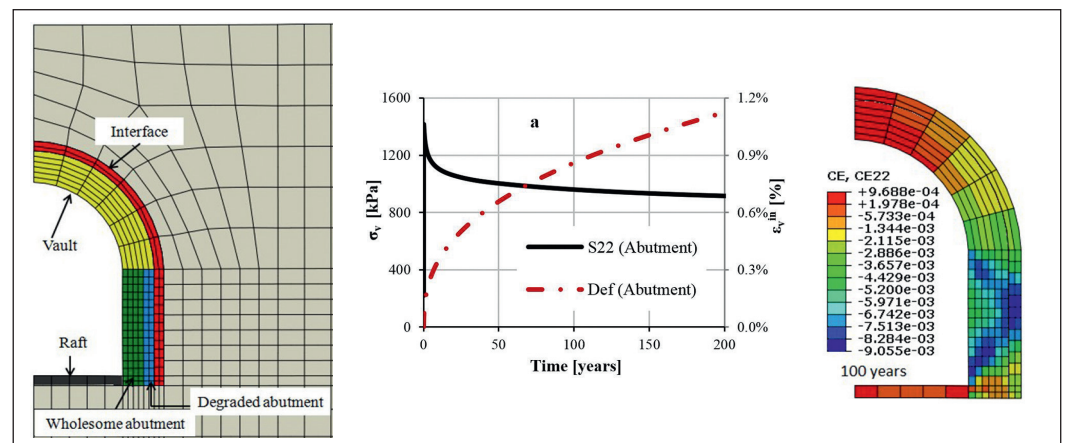


Figure 8 - a) Maillage d'un couloir d'accès de métro comportant différentes zones de l'ouvrage ayant des propriétés mécaniques différentes (radier, voûte, piedroit sain et dégradé et interface). b) Déformation viscoplastique dans l'ouvrage / ??????? Digital modelling.

Afin de représenter l'état mécanique actuel dégradé de ces ouvrages, deux démarches ont été proposées : une dégradation instantanée (sans prise en compte de l'effet du temps)

2.6 - Benefits of digital modelling

In order to emphasize the most problematic zones as regards to stability

any given size and type of structure (gallery or tunnel).

Two approaches are suggested to display the current, degraded mecha-

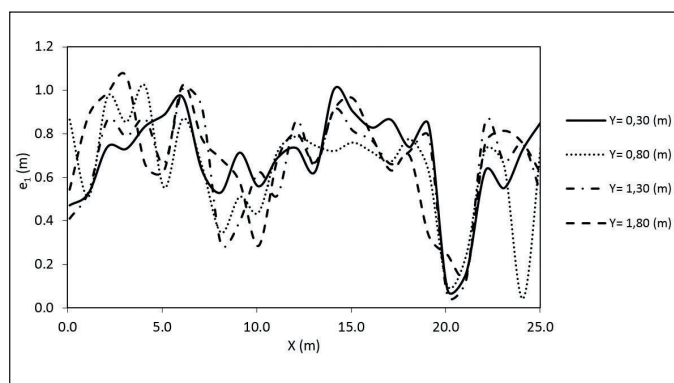


Figure 9 - Evaluation de l'épaisseur saine de maçonnerie à partir de l'essai d'impédance mécanique / Evaluation of the sound thickness of masonry using the mechanical impedance test.

ou différée (avec prise en compte des effets du temps) des ouvrages. Les simulations instantanées, bien que ne rendant pas compte de façon précise de l'évolution de l'état mécanique des ouvrages permettent de donner un ordre de grandeur des seuils de résistance de ces ouvrages avant instabilité. Il ressort de cette étude instantanée qu'il est nécessaire d'avoir au moins un 1/3 de piedroit sain. Une augmentation du seuil en résistance nécessaire est notée si la dégradation dépasse les 2/3 de l'épaisseur, principalement, si le confinement augmente. Il en découle l'obligation d'une régénération des galeries. La comparaison entre le cas instantané et différé, faite en termes de résistance indispensable pour la stabilité de ces structures souterraines, recommande fortement la prise en compte du comportement différé.

Les modélisations numériques ont ainsi permis d'estimer le potentiel résiduel des ouvrages et son évolution dans le temps.

L'analyse du développement de vides au sein de l'ouvrage a également été étudiée. La perte de la matière causée par le pourrissement du bois de blindage et la désagrégation des matériaux constitutifs des ouvrages à leurs extrados a été modélisée par extraction d'éléments à un temps donné. La création de vides dans

l'ouvrage modifie l'état de contrainte suite à une redistribution des efforts, spécifiquement autour des vides. Ces derniers n'influent pas sur le mouvement et la déformation en terme global, mais en terme local, la déformation devient plus importante sur leur contour. L'effet du vide devient plus important s'il se développe dans le sol-encaissant.

3 - Etude de cas

Le site ausculté concerne un tronçon de tunnel désaffecté du patrimoine RATP.

L'ouvrage ausculté est constitué d'un tunnel en demi-ellipse (voûte). La hauteur de la clé de voûte par rapport au dallage est d'environ 5,50m. La longueur de l'ouvrage est d'environ 25,5m. Le tunnel a été construit en maçonnerie et date des années 1920. Aucun travail de réfection n'a été réalisé jusqu'à ce jour.

3.1 - Analyse des résultats d'impédance mécanique

L'analyse des résultats permet de déceler des zones où le revêtement présente des variations d'épaisseur saine importantes. Par ailleurs, ces résultats corroborent les hypothèses selon lesquelles l'endommagement d'une maçonnerie est pour la plupart des cas, un phénomène localisé. (Fig.9).

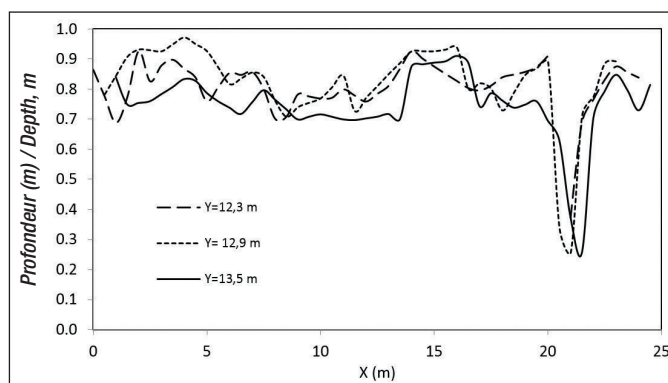


Figure 10 - Evaluation de l'épaisseur effective de maçonnerie à partir de l'essai radar / Evaluation of the effective thickness of masonry on the basis of the radar test.

nical condition of these structures: instantaneous deterioration (does not take the time factor into account) and deferred deterioration (takes the time factor into account). Instantaneous simulations do not show changes in the mechanical condition of structures to a high degree of accuracy, but they do provide an order of magnitude for the strength thresholds of these structures prior to them becoming unstable. The instantaneous study shows that at least one third of the abutment must be sound. An increase in the necessary strength threshold is noted if deterioration exceeds two-thirds of the thickness, principally if confinement increases. In such cases, the galleries in question must be renovated. As a result of comparisons between instantaneous and deferred scenarios in terms of the strength required for the stability of these underground structures, taking into account the deferred behaviour is strongly recommended.

Analysis of the development of cavities within the structure was also studied. The loss of materials caused by shielding timbers rotting and the crumbling of the component materials of the outer walls of the structures was simulated by removing various components at a given time. When cavities are created in the structure, this changes stress patterns due to a redistribution of forces, particularly around the cavities themselves. Cavities do not have any overall influence on movement or

deformation, but locally, deformation is greater around their edges. Cavities are more significant if they develop in the surrounding soil.

3 - Case studies

The inspected site was a disused section of tunnel belonging to RATP. The inspected structure consists of a half-ellipse tunnel (vault). The top of the vault was approximately 5.50 m above the slabwork. The structure was approximately 25.5 m long. The tunnel was built using masonry in the 1920s. No renovation work had been carried out since then.

3.1 - Mechanical impedance test results

Analysis of these results allowed areas in which the lining had significant variations in the amount of sound thickness to be identified. These results also corroborate the hypothesis that masonry damage is generally a localized phenomenon. (Fig. 9)

3.2 - Analysis of radar test results

Profiles of the effective lining thickness could be constructed using the results of the georadar test, calibrated using the geoendoscopy tests. (Fig. 10).

3.2 - Analyse des résultats radar

Les résultats de l'essai géoradar calibrés au moyen des essais géoendoscopiques ont permis de construire les profils de l'épaisseur effective du revêtement. (Fig. 10).

Les résultats montrent l'évolution de l'épaisseur effective (e_{eff}) du revêtement pour chacun des profils. Ils permettent de mettre en évidence l'apparition de zones où l'épaisseur diminue de manière importante.

3.3 - Analyse des résultats des essais géoendoscopiques

Une série de forages de taille réduite a été utilisée pour mener une caractérisation locale de l'état des revêtements. Ces essais ont pour but de définir les différentes sous-épaisseurs composant le revêtement (e₁, e₂ et e₃). Des essais géoendoscopiques et pénétrométriques ont été conduits à l'intérieur des différents sondages, les

données de résistance de pointe (q_d) ont été complétées par une caractérisation physique des matériaux par géoendoscopie. Le Tableau 5-4 compile les résultats de ces analyses.

3.4 - Notation du panneau

Conformément à la méthodologie de notation MEDITOSS, l'ensemble des analyses ont permis l'obtention de la

The results show changes in the effective thickness (e_{eff}) of the lining for each profile. They show the development of areas in which this thickness has decreased significantly.

3.3 - Analysis of the results of geoendoscopy tests

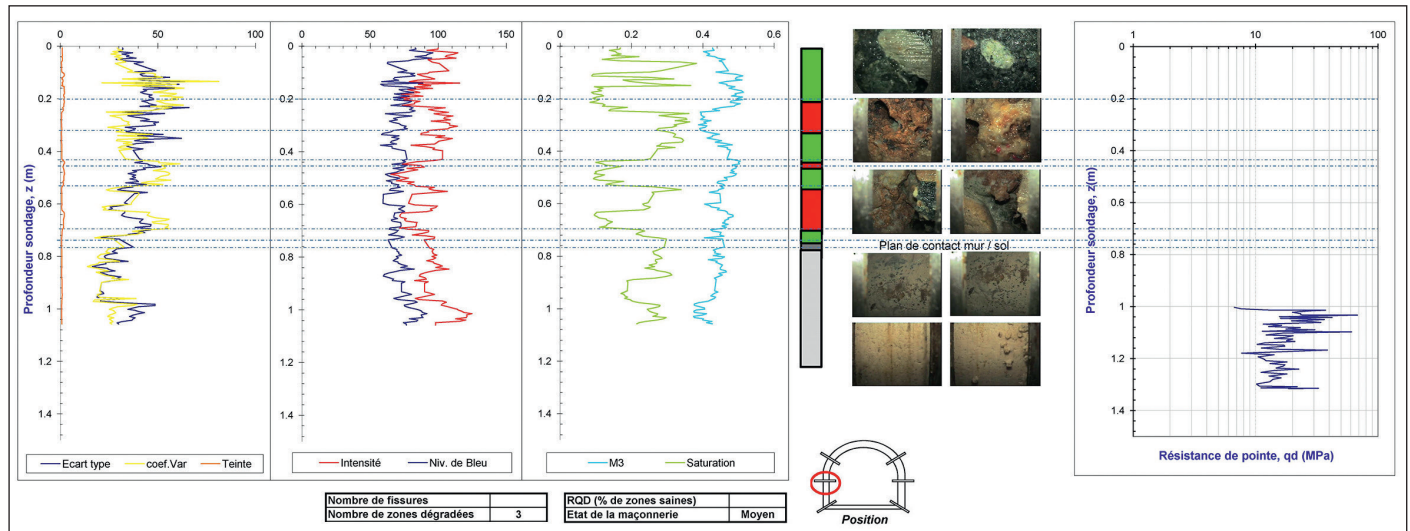
A series of small-diameter probes were used to carry out local definition

of lining condition. The purpose of these tests was to define the various sub-thicknesses within the lining (e₁, e₂ and e₃).

Geoendoscopy and penetrometer tests were carried out inside various boreholes. The cone tip resistance (q_d) data was supplemented by physical identification of materials by geoendoscopy. Table 5-4 shows the compiled results of these analyses.

Nom / Name	Mur / Wall	X (m)	Y (m)	q _d amoyen (MPa) / Mean q _d (mPa)	Type de sol au contact / Type of soil at contact	Etat du contact / Condition of contact	Etat hybride / Hydric condition
C1	A	15	1,3	25	Sable-limoneux / Clayey sand	Bon / Good	Humide / Damp
C2	A	10	1,3	10	Sable-limoneux / Clayey sand	Mauvais / Poor	Humide / Damp
C3	B	5	1,3	15	Marneux / Marly	Mauvais / Poor	Humide / Damp
C4	B	11	1,8	20	Marneux / Marly	Bon / Good	Humide / Damp
C5	B	21	1,8	10	Marneux / Marly	Mauvais / Poor	Humide / Damp
F1	A	5	1,3	24	Marneux / Marly	Bon / Good	Humide / Damp
F2	A	12,5	1,3	38	Sable-limoneux / Clayey sand	Bon / Good	Humide / Damp
F3	A	23	1,45	40	Sable-limoneux / Clayey sand	Bon / Good	Humide / Damp
F4	B	20,5	1,15	35	Sable-limoneux / Clayey sand	Bon / Good	Humide / Damp
F5	B	8,5	1,45	15	Sable-limoneux / Clayey sand	Mauvais / Poor	Humide / Damp
F6	B	2,5	1,30	40	Sable-limoneux / Clayey sand	Bon / Good	Humide / Damp

Figure 12 - Evaluation du contact et du terrain encaissant par couplage d'essais pénétrométriques PANDA® et géoendoscopiques / Evaluation of contact and surrounding terrain combining PANDA® penetrometer and geoendoscopy tests.



Forage / Drill hole	X (m)	Y (m)	Epaisseur totale (m) / Total thickness (m)	e ₁ (m)	e ₂ (m)	e ₃ (m)
F1	5	1,3	1,04	0,90		0,14
F2	12,5	1,3	0,8	0,80		
F3	23	1,45	0,9	0,54	0,35	
F4	20,5	1,45	0,45	0,08	0,37	
F5	8,5	1,45	0,9	0,70		0,20
F6	2,5	1,30	0,86	0,86		

Figure 11 - Evaluation des épaisseurs de maçonnerie à partir de l'essai géoendoscopique / Evaluation of masonry thicknesses on the basis of the geoendoscopy test.

cartographie suivante:

Le panneau présente également 4% de notes supérieures à 6 sur l'ensemble des points de mesure. La note moyenne calculée pour le panneau est de 3.

4 - Conclusion et perspectives

L'étude présentée permet 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 ses 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 bonne qualité 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 meulière¹ 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).

¹ Meulière : seule roche dure du sous-sol parisien, cette roche siliceuse vacuolaire est largement utilisée dans les maçonneries des

pavillons de banlieue et des ouvrages souterrains. (outre les meules de moulin, d'où elle tient son nom.)

Ainsi, les avancées scientifiques du projet MEDITOSS se situent essentiellement dans :

- l'amélioration des méthodologies de diagnostic actuelles (notamment de l'état des maçonneries), en privilégiant des technologies peu ou pas intrusives et permettant d'avoir accès à une estimation de la variabilité des caractéristiques des composants,
- l'amélioration de l'identification en place des matériaux notamment au moyen de la géoendoscopie et de l'essai de pénétration,
- une meilleure estimation des modules de déformation des sols à partir de l'essai de pénétration permettant l'alimentation des modèles numériques, (non abordé dans l'article)
- une véritable prise en compte de l'interaction sol/structure et de la variabilité des données dans les modèles numériques,
- une analyse des critères d'aide à la décision les plus pertinents dans le contexte d'une analyse de risque. (non abordé dans l'article)

Ainsi ce projet a permis la mise au point d'une méthodologie opérationnelle qui a fait ses preuves sur le patrimoine RATP, et a été testé sur des tunnels autoroutiers et ferroviaires. ♦

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.

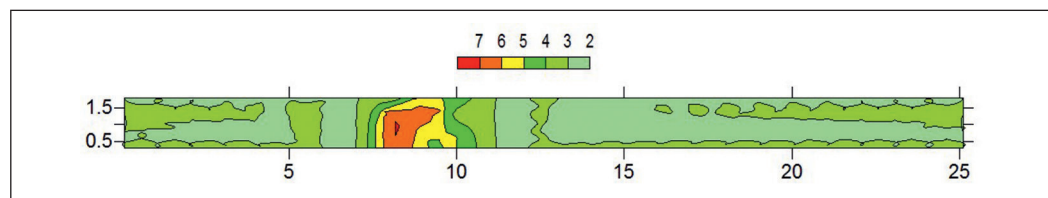


Figure 13 - Cartographie de la notation ponctuelle du panneau / Map of individual panel scores.

3.4 - Panel scoring

Based on the MéDiTOSS scoring method, the following map was obtained on the basis of the analysis as a whole: (Fig. 13)

4% of the scores for all the measurement points on the panel are over 6. The mean score for the panel is 3.

4 - Conclusions and outlook

The study presented here allows the state of deterioration of underground masonry structures to be defined. Estimation of the general state of deterioration of a structure is important in order to allow those responsible for it to conduct an optimized maintenance policy. This estimation must include quantifying the degree of deterioration of the structure's masonry, both locally and overall. A study of the mechanical characteristics of samples extracted from core samples has shown that these characteristics are generally of good quality for most materials comprising the sample, but that there can be quite significant variability due to the variable nature of the materials encountered. Millstone grit¹, however, displays characteristics that are sensitive to its degree of deterioration. It also appears that the behaviour of samples does not represent the overall behaviour of the structure; this is more accurately shown by the state of deterioration of the core samples (particularly RQD). Geoendoscopy analysis allows the degree of deterioration to be determined automatically, offering a useful supplement to conventional visual analysis. This technique also allows an analysis of the interface between the structure

and the surrounding terrain (contact) to be performed.

¹ Millstone grit: the only hard rock below Paris; this silica-rich vacuolar rock is widely used in masonry for houses in the suburbs and underground structures (as well as for millstones, whence its name).

Scientific progress achieved by the MéDiTOSS project relates mainly to the following:

- improved current diagnosis methodologies (in particular, the condition of masonry), using mostly non-intrusive or slightly intrusive technologies, and by having access to an estimation of the degree of variability of component characteristics
- improved in-situ identification of materials, particularly by means of geoendoscopy and penetration testing
- better estimation of soil modulus of deformation based on penetration tests, which can then be used for digital modelling
- taking soil/structure interaction and variability in data properly into account in digital models
- analysis of the most relevant decision support criteria for risk analysis.

The project has allowed an operational methodology to be developed which has proved its worth for RATP assets and been tested on motorway and rail tunnels. ♦

Acknowledgements: This work forms part of the MéDiTOSS project (Sustainable Cities RFP) with financial support from the French National Research Agency (ANR) and Ministry of Research.