

# Contribution des Prestations Topographiques Dans L'étude Et le Suivi des Tunnels : Cas D'étude, Tunnel des Oudayas

Mohamed OUHAMA, Mohammed ALAOUI, Tayeb TACHALLAIT et Yassine BAHIJ,  
MAROC

**Mots clés :** tunnel, topographie, suivi, démarche qualité, plan d'assurance qualité, contrôles topographiques, étude, exécution, système de monitoring.

## RÉSUMÉ

Dans l'objectif de mettre à l'honneur le site historique et touristique des Oudayas, et d'améliorer les conditions de circulation au niveau de la séquence rive gauche de la vallée du Bouregreg à l'aval du pont Moulay Al Hassan, l'Agence pour l'aménagement de cette vallée a opté pour la construction d'un tunnel.

Cependant, l'aboutissement d'un projet tunnel exige l'implication de plusieurs intervenants et disciplines, parmi lesquelles la Topographie qui revêt une grande importance durant toutes les phases de réalisation des travaux : phase d'étude, phase d'exécution et après la mise en service du tunnel.

En effet, le rôle de l'Ingénieur Géomètre Topographe se manifeste dans le suivi et l'auscultation des ouvrages réalisés ou en cours de réalisation tout en respectant une démarche qualité bien définie par un plan d'assurance qualité (PAQ), ce dernier décrit l'organisation général du chantier et met en relief les procédés et les différents contrôles topographiques nécessaires à la réussite d'un projet tunnel.

Pour concrétiser notre travail, une étude expérimentale est réalisée en vue de comparer deux systèmes de monitoring mis en place, pour le contrôle et le suivi du tunnel et du bâtiment historique des Oudayas.

**Key words:** tunnel, surveying, monitoring, quality process, Plan quality assurance, topographic controls, study, execution, monitoring system.

## SUMMARY

In the objective to honor the historic and touristic Oudayas, and improve traffic conditions at the left bank of the sequence Bouregreg valley downstream from the bridge Moulay Al Hassan, the agency for the development of this valley has opted to build a tunnel.

However, the culmination of a tunnel project requires the involvement of multiple stakeholders and disciplines, including topography, which is of great importance during all phases of production work: study phase, implementation phase and after commissioning of the tunnel Oudayas.

Indeed, the role of the engineer surveyor is manifested in the monitoring and instrumentation works completed or in progress while maintaining a quality well-defined plan of quality assurance (PQA), this latter describes the general organization of the site and highlighted the various processes and controls necessary for the topographic successful project tunnel.

To accomplish our work, an experimental study was conducted to compare two monitoring systems putted in the same place for supervising and monitoring the tunnel and the historic building.

# Contribution des Prestations Topographiques Dans L'étude Et le Suivi des Tunnels : Cas D'étude, Tunnel des Oudayas

Mohamed OUHAMA, Mohammed ALAOUI, Tayeb TACHALLAIT et Yassine BAHIJ, MAROC



Tunnel des Oudayas.

## 1. PROBLEMATIQUE

La Kasbah des Oudayas, l'un des plus beaux sites historiques de l'agglomération de Rabat-Salé, souffre des nuisances intolérables de circulation : plus de 30.000 véhicules par jour en moyenne, dont 3.500 poids-lourds et autocars, passent à quelques mètres de ses murailles. Ces nuisances ont provoqué une coupure entre la cité des Oudayas et l'ancienne médina, rendant chaque fois la traversée de la chaussée un acte périlleux et un danger sur la stabilité du bâtiment historique.

## 2. OBJECTIFS DU PROJET

Pour remédier aux problèmes cités dans le paragraphe ci-dessous, l'Agence pour l'aménagement de cette vallée a opté pour la construction d'un tunnel.

Cependant, l'aboutissement d'un projet tunnel exige l'implication de plusieurs intervenants et disciplines, parmi lesquelles la Topographie qui revêt une grande importance durant toutes les phases de réalisation des travaux : phase d'étude, phase d'exécution et après la mise en service du tunnel.

En effet, le rôle de l'Ingénieur Géomètre Topographe se manifeste dans le suivi et l'auscultation des ouvrages réalisés ou en cours de réalisation.

Pour concrétiser notre travail, une étude expérimentale est réalisée en vue de comparer deux systèmes de monitoring mis en place, pour le contrôle et le suivi du tunnel et du bâtiment historique des Oudayas.

**Mots clés :** tunnel, topographie, suivi, démarche qualité, plan d'assurance qualité, contrôles topographiques, étude, exécution, système de monitoring.

## 3. ETAPES DE CONSTRUCTION D'UN TUNNEL

Avant les travaux d'excavation, des travaux préparatoires devront être réalisés, tels que les chemins d'accès, les plateformes pour les bureaux et les ateliers.

### 3.1. Installation du chantier

Etant donné que les activités de creusement et de soutènement provisoires du tunnel ne peuvent être interrompues à aucun moment pour des raisons de sécurité, les installations doivent impérativement assurer l'approvisionnement en continu des différents matériaux nécessaires, tels que le béton projeté, les cintres, etc.

### 3.2. Excavation

Le processus d'excavation est effectué en trois phases principales, ce sont le confortement provisoire du front, l'abattage et le marinage.

#### 3.2.1. Confortement provisoire de la galerie et du front (enfilage)

Cette étape consiste à mettre en place des barres ou des plaques d'acier longitudinales, à la périphérie du front de taille, le plus souvent sur le tiers ou le quart supérieur de la circonférence. L'objectif de l'enfilage est d'assurer la sécurité immédiate de l'excavation avant la pose du soutènement provisoire (Figure 1).

#### 3.2.2. Abattage

Pour un tunnel en rocher, on distingue trois techniques d'abattage, elles sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Techniques d'abattage.

**- Creusement à pleine section**

Dans cette méthode, le dégagement complet de la section principale de l'ouvrage à lieu en une

Technique d'abattage	Caractéristiques
Abattage à l'explosif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus utilisée dans les roches en pleine et demi-section.</li> <li>- Le plan de tir doit être adapté pour limiter l'effet des tirs sur le terrain encaissant et assurer un découpage soigné de la section.</li> </ul>
Abattage par machine à attaque ponctuelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- N'entraînant pas d'ébranlement dans l'environnement et préférable à l'explosif.</li> <li>- Utilisation limitée par les caractéristiques de résistance du terrain encaissant.</li> </ul>
Excavation par machine foreuse à pleine section	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bien adaptée aux zones urbaines et aux ouvrages longs.</li> <li>- Difficultés en cas de rencontre d'un accident ou en terrains hétérogènes.</li> </ul>

seule fois, ce type de creusement est bien adapté aux terrains homogènes, ne nécessitant pas l'utilisation d'un autre soutènement que le boulonnage et le béton projeté.

**- Creusement en demi-section**

Dans la méthode de creusement en demi-section, on réalise d'abord le creusement de la partie supérieure de la section, la partie inférieure étant réalisée avec un décalage dans le temps.

Après abattage, vient l'opération de marinage qui consiste en le chargement du rocher abattu en souterrain et son transport hors du tunnel.





Figure 1 : Confortement provisoire du front.

### 3.3. Revêtement provisoire

Le revêtement provisoire est une structure qui permet d'assurer la stabilité des parois d'une cavité souterraine pendant le temps qui s'écoule entre son creusement et la mise en place éventuelle du revêtement définitif. En fonction de leur mode d'action par rapport au terrain,

### 3.4. Etanchéité

Cette opération consiste à mettre en œuvre au contact (intrados ou extrados) du revêtement un système d'étanchéité imperméable afin d'assurer le confort et la sécurité des usagers, empêcher une présence continue d'eau sur la chaussée et protéger l'ouvrage des eaux d'infiltration (Figure 2).

### 3.5. Revêtement définitif

Une fois le tunnel excavé, provisoirement soutenu et le complexe d'étanchéité installé, rien ne s'oppose au bétonnage de l'anneau intérieur, cette opération a pour objectif de remplacer le revêtement provisoire par un revêtement définitif, donner un aspect plus esthétique, protéger l'étanchéité, et également elle permet d'enchâsser une partie de la tuyauterie et des câbles, les protégeant ainsi contre un incendie éventuel.



Figure 2 : Etanchéité.

## 4. ENCHAINEMENT DES PRESTATIONS TOPOGRAPHIQUES DANS LES DIFFERENTES PHASES D'ELABORATION D'UN PROJET TUNNEL

### Propositions d'étude

#### 4.1. Elle consiste en la remise d'un **Topographie dans la phase étude d'un projet tunnel**

Le processus conduisant à l'étude d'un projet tunnel est subdivisé en trois phases :

- Etude de définition.
- Etude de l'avant projet.
- Projet d'exécution.

##### 4.1.1. Etude de définition

Cette phase a pour objet de définir la problématique du projet ainsi que les différents enjeux territoriaux, en se basant sur une analyse multicritère des données topographiques, géographiques, géologiques, géotechniques, hydrauliques, socio-économiques et environnementales. Elle consiste aussi à rechercher les scénarios possibles et anticiper une réflexion commune sur les variantes à moyen et à long terme en fonction du développement de la zone et son intégration dans le développement du pays. L'étude de définition dans un projet tunnel s'effectue comme suit :

### Recueil des données de base

Il s'agit de la collecte des données topographiques de la zone d'étude (données qui peuvent être recueillies directement sur le terrain ou à partir de l'exploitation des cartes ou des produits de la photogrammétrie ou de l'imagerie satellitaire).

### Etude des tracés

Cette étude consiste à évaluer tous les itinéraires possibles et d'étudier l'impact sur l'économie régionale, ainsi que les conséquences environnementales, urbanistiques et les contraintes financières.

### Recueil des données complémentaires

Il s'agit de la collecte des données géotechniques, hydrologiques, géologiques et données relatives aux ouvrages d'art et hydrauliques.

### Définition des parties

Dans cette étape, on procède à l'élimination des tracés moins intéressants en se basant sur les données complémentaires.

dossier d'étude de définition et d'un dossier d'appel à la concurrence en précisant les méthodes et les couloirs d'étude qui font l'objet des opérations topographiques.

#### 4.1.2. Etude de l'avant projet

Sur la base de la solution retenue dans l'étude de définition, on procède à la définition des caractéristiques principales de l'ouvrage et à l'évaluation de son coût. Un fond de plan topographique à grande échelle est utilisé. Cette étude a pour objet de définir les différentes options du tracé du projet, décrire les impacts et mesures en faveur de l'environnement et faire une étude géométrique et socio-économique du trafic.

#### 4.1.3. Etude du projet d'exécution

Le but de cette étude est de définir l'ouvrage dans tous ses détails dans le but de faire appel à la concurrence et à l'exécution des travaux de la variante retenue. Les principaux éléments d'étude, dans leur ordre d'exécution, sont :

- Prestations topographiques : établissement des documents aux échelles requises.
- Etudes géotechniques : études complémentaires dans le cas où l'étude effectuée au niveau de l'avant projet révélerait la présence de difficultés.
- Etude géométrique : calage définitif de l'axe en plan et du profil en long.
- Implantation de l'axe définitif.

Les opérations topographiques pendant ce stade d'étude sont les suivantes :

##### **Etablissement de la polygonale de base**

L'établissement de la polygonale de base est une étape importante dans un projet tunnel, elle doit être menée avec une grande précision. Des cheminements planimétriques et altimétriques sont mis en place pour la réalisation de cette polygonale à la base de laquelle sont effectuées les études complémentaires du projet.

##### **Etablissement du plan coté**

Le plan coté a pour objet de représenter tous les détails de la bande d'étude tant en planimétrie qu'en altimétrie. L'établissement de ce plan est basée sur la polygonale de base préalablement approuvée par le Maître d'Ouvrage.

Les autres prestations topographiques sont résumées dans le tableau 2.

Type de relevé	Contrôle interne	Contrôles externe et extérieur	Tolérance
Implantation	<ul style="list-style-type: none"><li>• Matérialiser les points de l'axe géométrique ou les points de coffrage.</li><li>• Calculer leurs coordonnées sur la base des plans visés Bon Pour Exécution.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Relever les points implantés</li><li>• Vérifier leur conformité par rapport aux plans visés Bon Pour Exécution.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coffrage : <math>\pm 5</math> mm</li><li>• Forage : <math>\pm 5</math> cm</li></ul>



Fond de fouille	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier le niveau d'excavation par rapport au projet.</li> <li>• Matérialiser les niveaux du Béton de propreté.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effectuer un relevé contradictoire du fond de fouille d'excavation et des niveaux du béton de propreté implantés.</li> </ul>	±2.5 cm
Cintres	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veiller à la pose du cintre.</li> <li>• Relever plusieurs points sur le cintre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier les points relevés par rapport au projet.</li> </ul>	±15 cm
Profils d'intrados du revêtement provisoire et définitif	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effectuer des relevés de plusieurs points sur les cintres.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effectuer des relevés au droit ou entre les cintres par moyen d'un distancemètre ou un profilomètre.</li> <li>• Calculer les écarts par rapport aux profils théoriques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Définitif : ±5 mm</li> <li>•Provisoire: ±15 cm</li> </ul>

Tabl  
eau

2 : Divers relevés topographiques effectués dans le tunnel des Oudayas.

## 5. AUSCULTATION DU TUNNEL ET DU BATIMENT HISTORIQUE

Le but de l'auscultation est de suivre le comportement de l'ouvrage considéré, afin de vérifier que celui-ci est normal et correspond aux attentes et aux hypothèses émises lors de la conception, du dimensionnement et de la construction.

Pour pouvoir effectuer le contrôle des opérations d'excavation et de construction, il est nécessaire de définir les valeurs de référence des paramètres soumis à la surveillance, de façon à déterminer le passage d'un seuil d'attention à un seuil d'alarme.

### 5.1. Définition des valeurs de seuil

Un **seuil d'attention** représente une valeur suffisamment prudente d'un paramètre de mesure, qui ne représente pas un danger immédiat pour les personnes et les structures. Pourtant il faut activer une série de procédures de contrôle ayant pour but de revenir dans la norme, ou au moins d'éviter la tendance des valeurs de mesure vers le seuil d'alarme.

Un **seuil d'alarme** est une valeur d'un paramètre de mesure qui représente un danger potentiel pour les personnes et les structures, d'où l'obligation d'activer une série de procédures de contrôle et éventuelles actions ayant pour but de revenir dans la norme, ou au moins d'éviter la tendance des valeurs de mesure à augmenter encore.

Les seuils d'attention et d'alarme figurent dans le tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs de seuil du tunnel des Oudayas.

**Grandeur mesurée :**

- $\Delta L$  : variation de longueur d'une distance entre points de la section.
- $\Delta Z$  : variation de niveau NGM.
- $\Delta L_r$  : variation de longueur d'une distance entre points de la section du revêtement.
- $\Delta \Phi$  : valeur de l'inclinaison.
- $\Delta L_e$  : variation de distance entre repères au terrain.
- $N$  : pression sur le vérin.
- $\Delta L_f$  : variation de distance entre repères solidarisés au terrain.

**5.2. Auscultation du tunnel**

Instrumentation	Seuil d'attention	Seuil d'alarme	Grandeur mesurée
Cibles optiques pour convergences de demi-section supérieure	30	50	$\Delta L$ (mm)
Repères de nivellement en surface	20	50	$\Delta Z$ (mm)
Inclinomètres	1 / 2500	1 / 1500	$\Delta \Phi$ (rad)
Extensomètres	20	50	$\Delta L_e$ (mm)
Vérins Plats	1.5	2.0	$N$ (N.m <sup>-2</sup> )
Extrusomètre	25	50	$\Delta L_f$ (mm)

Les objectifs de l'auscultation du tunnel sont présentés dans le tableau 4.

Type de relevé	Objectif
Relevés en surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>Détecter les affaissements absolus et relatifs ainsi que les déplacements horizontaux des ouvrages.</li> <li>Etudier les variations des anomalies déjà existantes sur les structures et sur les éléments préexistants.</li> </ul>
Relevés en souterrain (autour du tunnel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluer les affaissements des points placés à l'intérieur du terrain au-dessus de la calotte.</li> <li>Déterminer les déplacements horizontaux le long des verticales placées latéralement à proximité du tunnel.</li> </ul>
Relevés en tunnel (en cours d'ouvrage)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesurer les convergences du pourtour d'excavation ou des revêtements provisoire et définitif.</li> <li>Mesure les déplacements du front d'excavation.</li> <li>Détecter les charges agissant sur les revêtements de première phase.</li> </ul>

Tableau 4 : Objectifs des relevés topographiques dans le tunnel.

### 5.3.Auscultation du bâtiment historique

Le système de monitoring prévu pour le suivi du Bâtiment Historique a été conçu en fonction de l'importance du Bâtiment et de la difficulté de réalisation des opérations d'excavation en dessous et à coté de la structure. Comme celui du tunnel, le système de monitoring du bâtiment historique est basé sur des méthodes topographiques et non topographiques, avec un ensemble d'instruments (Tableau 5).

Instrumentation	Seuil d'attention	Seuil d'alarme	Grandeur mesurée
Tassomètre	$1 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$\Delta v/u$ (rad)
Clinomètre	$0.5 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$\Delta \Phi$ (rad)
Fissuromètre	1.0	1.5	$\Delta w$ (mm)

Cibles optiques	10	15	$\Delta u$ (mm)
Distancemètre	10	15	$\Delta l$ (mm)

Tableau 5 : Valeurs de seuil du bâtiment historique.

- $\Delta v$  : déplacement relatif vertical entre deux tasses du circuit.
- $u$  : distance horizontale entre les tasses.
- $\Delta\Phi$  : valeur d'inclinaison.
- $\Delta w$  : accroissement de l'amplitude de la fissure.
- $\Delta u$  : variation de la coordonnée X, Y ou Z d'un point sur le bâtiment historique.
- $\Delta l$  : variation de distance entre deux points sur le bâtiment historique.

## 6. COMPARAISON DES RESULTATS DE MESURE ENTRE LES CIBLES OPTIQUES ET LES FISSUROMETRES

L'étude expérimentale a pour principaux buts la comparaison des résultats de mesure des fissures au niveau du bâtiment historique des Oudayas, moyennant des méthodes topographiques (cibles optiques) et par des méthodes physiques (fissuromètres). Le choix des instruments à comparer est limité par la contrainte de leurs dispositions dans les mêmes endroits sur les murailles du bâtiment ainsi que la disponibilité des mesures journalières pour ces deux systèmes de monitoring

### 6.1. Méthodologie

Pour élaborer cette étude expérimentale, nous avons procédé comme suit :

- Choix des fissures sur lesquelles sont installées les cibles optiques et les fissuromètres.
- Levé des cibles optiques délimitant la fissure à l'aide d'une Station Totale de type Leica TPS 403 et à partir des piliers déterminés par centrage forcé.
- Collecte des données de mesure de l'évolution des fissures enregistrées par les fissuromètres auprès du bureau de la qualité.
- Traitement et analyse des résultats.

#### 6.1.1. Mesures par fissuromètres

Les mesures obtenues par cet instrument automatique sont enregistrées en mode continu, elles sont ensuite traitées dans la centrale d'acquisition des données. La formule sur laquelle est basée le fissuromètre pour calculer l'évolution des fissures est la suivante :

$$D = C * (L - L_0)$$

Avec

- $D$  : Déplacement en millimètres.
- $C$  : Coefficient d'étalonnage.

- L : Lecture actuelle.
- L<sub>0</sub> : Lecture initiale.

Trois fissuromètres sont choisis pour cette étude, F2, F3 et F4, ils sont installés sur la façade jardin du bâtiment.

### 6.1.2. Mesures par cibles optiques

Les cibles optiques sont installées sur la façade jardin du bâtiment auprès des fissuromètres, elles sont observées par une Station Totale (Leica TPS 403) à partir des piliers en béton dont les coordonnées sont déterminées par centrage forcé. Toute Station Totale est caractérisée par deux types d'erreurs, l'erreur sur la distance et l'erreur sur la direction (Figure 3).

- L'erreur sur la distance est donnée par la formule :  $\sigma_d = \pm (a + b \text{ ppm} \cdot d)$
- La première partie (a) est une erreur interne à l'appareil, elle est donnée en mm.
- La deuxième partie (b) étant une erreur dépendante du milieu atmosphérique, elle est donnée en ppm (partie par million).
- La distance d est en km.

Les observations des cibles optiques sont faites par les brigades topographiques inhérentes du contrôle externe du service qualité.

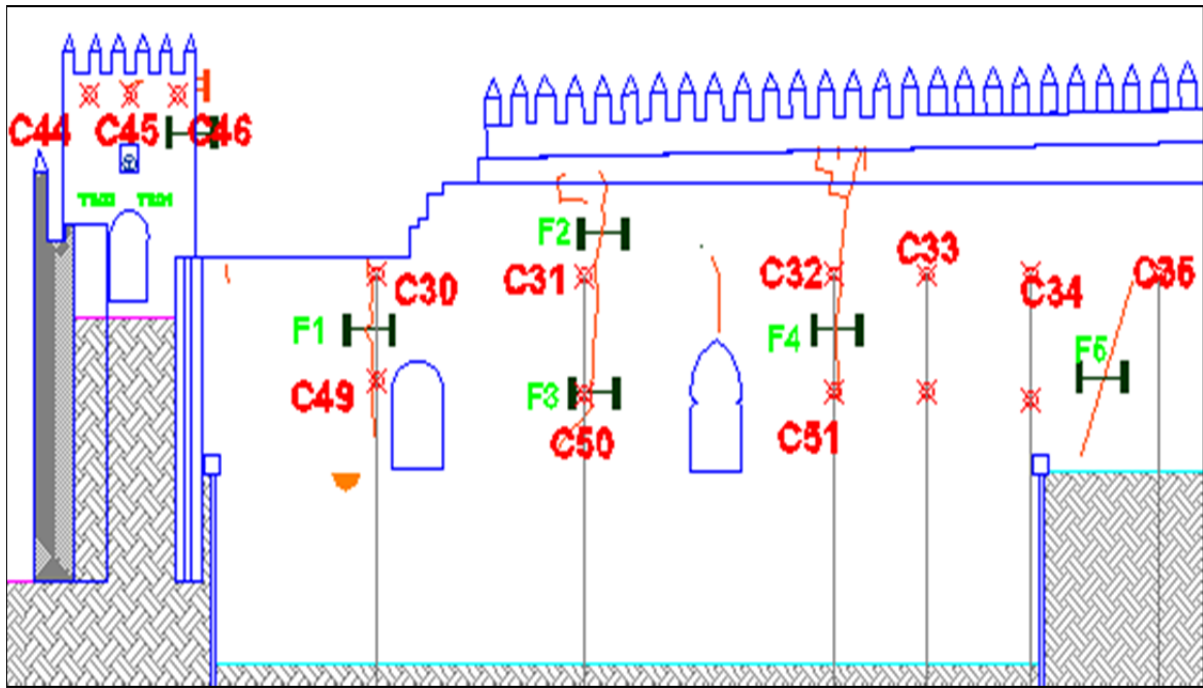


Figure 3 : L'emplacement des cibles optiques et des fissuromètres sujet de comparaison



## 6.2. Traitement des données

Le calcul des déplacements entre deux cibles optiques se fait de la manière suivante :

- Détermination des coordonnées des deux cibles.
- Calcul de la distance initiale entre ces deux cibles.
- Détermination des écarts des distances par rapport à la distance initiale.

Nous avons procédé au choix d'une période commune dans laquelle on dispose des mesures obtenues par les deux systèmes (du 06/06/2009 au 27/04/2010).

## 6.3. Comparaison visuelle

Pour faciliter l'interprétation, l'ensemble des résultats sera représenté sous forme de graphes qui représenteront l'évolution des fissures pour chaque système de monitoring pendant une année. Dans le but d'éliminer les fausses lectures et les pics transitoires, une fonction dite la moyenne mobile est utilisée.

### - Définition de la moyenne mobile

La moyenne glissante ou moyenne mobile est un type de moyenne statistique utilisée pour analyser des séries ordonnées de données, le plus souvent des séries temporelles, en supprimant les fluctuations transitoires de façon à en souligner les tendances à plus long terme. Cette moyenne est dite mobile parce qu'elle est recalculée de façon continue, en utilisant à chaque calcul un sous-ensemble d'éléments dans lequel un nouvel élément remplace le plus ancien ou s'ajoute au sous-ensemble. Ce type de courbe est défini par la fonction suivante :

$$F_t = (A_t + A_{t-1} + \dots + A_{t-n+1}) / n$$

### - Résultats avant application de la moyenne mobile

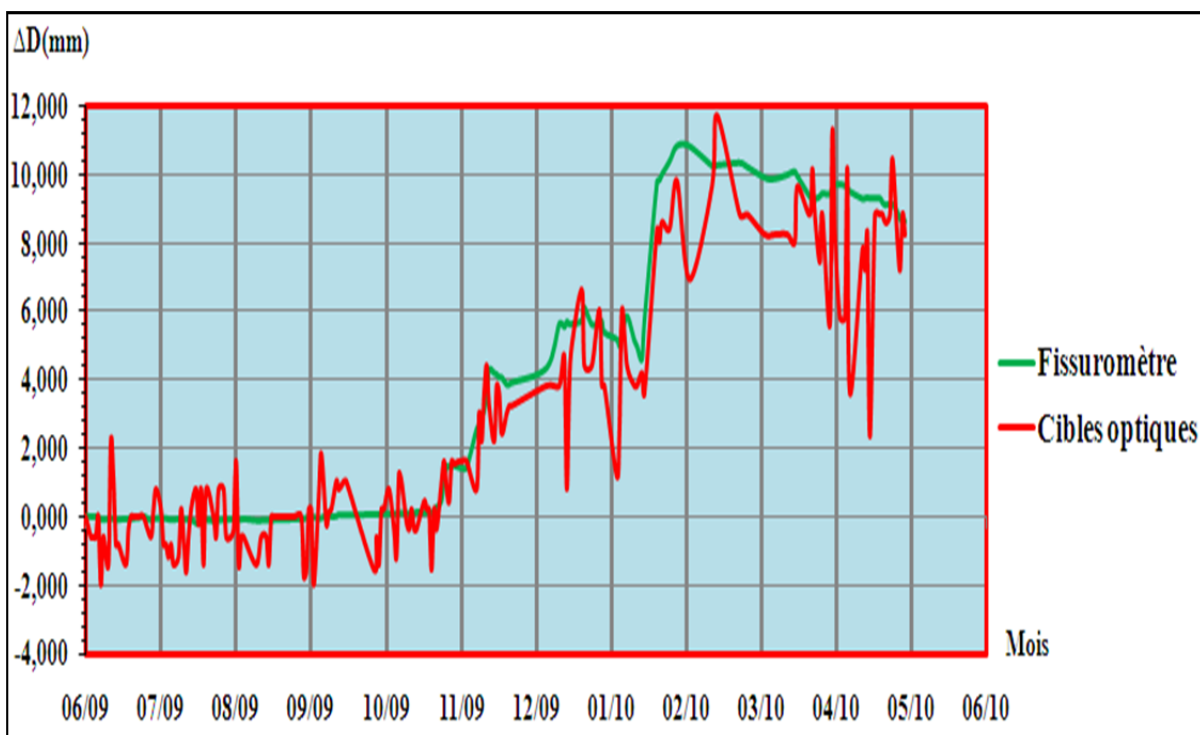


Figure 4 :Graphique des résultats du fissuromètre F2 et des cibles optiques C31 et C32.

- Résultats après application de la moyenne mobile

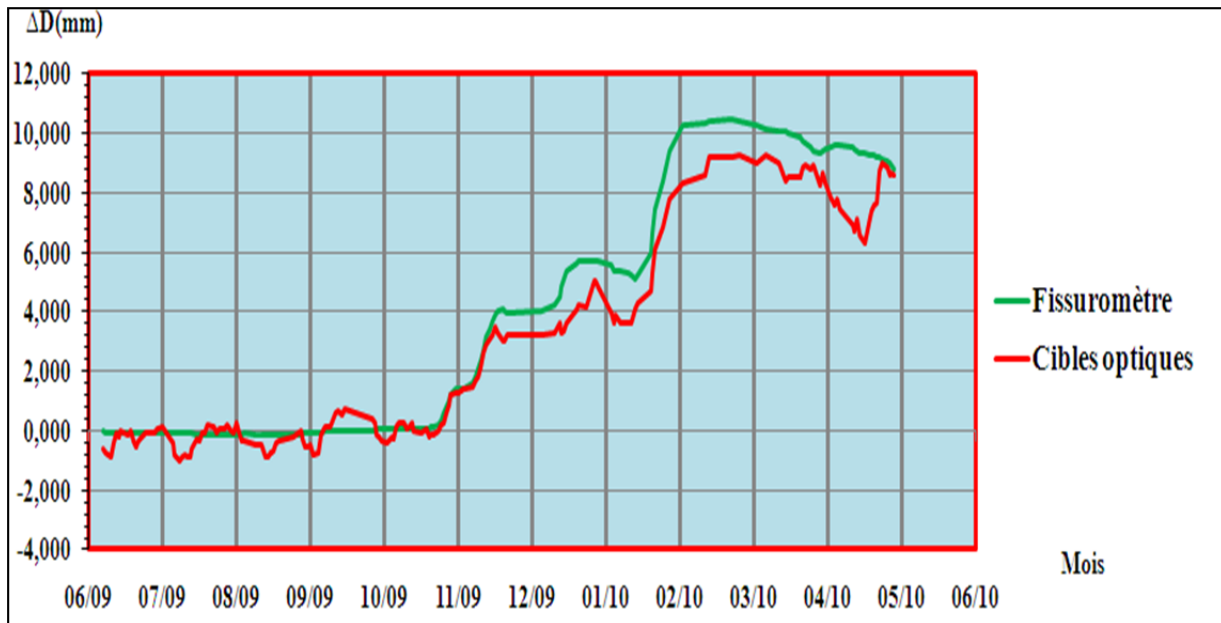


Figure 5 :Graphique des résultats du fissuromètre F2 et des cibles optiques C31 et C32.

Le résultat obtenu en traitant les données du fissuromètre et des cibles optiques est confirmé par le résultat que fournit le logiciel de traitement I-Site, ce logiciel utilisé par la société permet de fournir des graphes d'évolution des fissures (Figure 5).

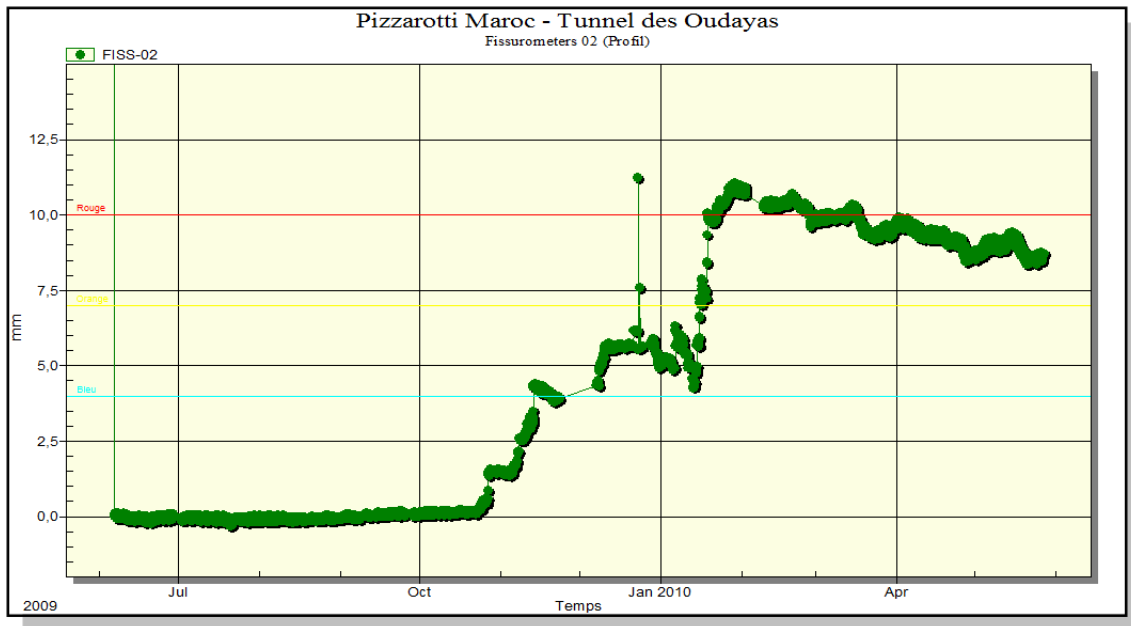


Figure 5 : Graphique des mesures du fissuromètre F2 obtenu par I-Site.

A partir des graphiques ci-dessus, on peut dire que l'évolution de la fissure suit trois phases principales :

- Première phase : de 06/09 au 11/09, pas d'évolution, cette stabilisation est due à l'absence des travaux d'excavation sous le bâtiment.
- Deuxième phase : de 11/09 au 02/10, marquée par une évolution progressive de la fissure qui atteint une valeur maximale au mois 02/10 (10 mm), ceci est dû aux travaux de percement et d'injection.
- Troisième phase : de 02/10 au 05/10, caractérisée par une diminution de la fissure puis une stabilisation.
- Une concordance entre les deux courbes car l'écart maximum ne dépasse pas 1.5 mm.

#### 6.4. Analyse statistique

Cette analyse a pour objet, d'évaluer les différences entre les deux méthodes de monitoring en faisant appel à un test dit test d'égalité des espérances.

#### 6.4.1. Test d'égalité de deux moyennes (échantillons associés par paires)

Les échantillons sont dits associés par paires, lorsqu'on choisit des couples d'individus ou d'objets similaires. Un individu du couple reçoit un traitement, l'autre reçoit un autre traitement. C'est le cas par exemple lorsqu'on compare deux méthodes de mesure en soumettant les mêmes individus à ces deux méthodes.

Ce test a pour but de vérifier si les moyennes des deux échantillons sont identiques. L'hypothèse  $H_0$  à tester est  $m_1 = m_2$  ou  $m_1 - m_2 = 0$ .

Les conditions d'application de ce test sont :

- Normalité des populations (n'est pas importante si les échantillons sont grands).
- Echantillonnage aléatoire et simple.

On calcule alors :

$$t_{\text{obs}} = \frac{|\bar{d}|}{\sqrt{\frac{SCE_d}{n(n-1)}}} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{SCE_d}{n(n-1)}}}$$

Avec :

- $SCE_d$  : somme des carrés des écarts des différences.

$$SCE_d = \sum_{i=1}^n d_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n d_i)^2}{n}$$

- dl : degré de liberté.
- $\bar{d}$  : moyenne des différences.
- $\alpha$  : niveau de signification
- $t_{1-\alpha/2}$  correspond à la distribution t de student à (n-1) dl.

L'hypothèse  $H_0$  est vérifiée si  $t_{\text{obs}} < t_{1-\alpha/2}$  à (n-1) dl, en fonction de degré de signification nous distinguons deux cas :

- Si  $t_{\text{obs}} < t_{1-\alpha/2}$  pour  $\alpha=5\%$ , le test est significatif.
- Si  $t_{\text{obs}} < t_{1-\alpha/2}$  pour  $\alpha=1\%$ , le test est hautement significatif.

#### 6.4.2. *Résultats du test d'égalité des espérances*

Les fissures sur lesquelles nous sommes basés pour faire ce test sont les suivantes :

- Fissure 1 : entourée par le fissuromètre F2 et les cibles optiques C31 et C32.

- Fissure 2 : entourée par le fissuromètre F3 et les cibles optiques C50 et C51.
- Fissure 3 : entourée par le fissuromètre F4 et les cibles optiques C32 et C33.

Pour respecter les conditions d'application de ce test, les valeurs des fissures sont prélevées aléatoirement. Les données sont présentées dans le tableau 6.

En appliquant le test d'égalité des espérances aux deux degrés de signification ( $\alpha=5\%$ ,  $\alpha=1\%$ ), nous obtenons les résultats figurant dans le tableau 7.

Données	N° fissure	Cibles optiques (mm)	Fissuromètre (mm)	Différence (mm)
Test 1	1	-0,37	-0,08	-0,29
	2	0,19	-0,09	0,28
	3	1,17	-0,09	1,25
Test 2	1	8,80	10,20	-1,40
	2	8,20	8,10	0,10
	3	0,80	0,25	0,55
Test 3	1	7,20	8,68	-1,48
	2	7,59	7,22	0,36
	3	-1,04	0,15	-1,18

Tableau 6 : Données de Test de comparaison des deux moyennes.

Degré de signification	Tests	Moyenne		Valeur observée ( $t_{obs}$ )	Valeur critique ( $t_{1-\alpha/2}$ )
		Cibles optiques	Fissuromètre		
$\alpha=5\%$	Test 1	0,33	-0,08	0,93	4,30
	Test 2	5,94	6,18	-0,42	4,30
	Test 3	4,58	5,35	-1,34	4,30
$\alpha=1\%$	Test 4	0,33	-0,08	0,93	9,92
	Test 5	5,94	6,18	-0,42	9,92
	Test 6	4,58	5,35	-1,34	9,92

Tableau 7 : Résultats de la comparaison des deux moyennes.

A partir du tableau 7, on peut tirer les conclusions suivantes :



- Pour les trois degrés de signification, la valeur absolue de la valeur observée de l'ensemble des tests est inférieure à la valeur critique à deux degrés de liberté, nous pouvons conclure que le test est très hautement significatif et l'hypothèse nulle  $H_0$  ne peut être rejetée.
- Les deux méthodes d'auscultation donnent en moyenne les mêmes résultats.

### 6.5. Avantages et désavantages des Cibles optiques et Fissuromètres

En plus de la comparaison visuelle et statistique des résultats obtenus par les deux systèmes de monitoring, nous avons effectué une comparaison en se basant sur plusieurs paramètres dont les résultats figurent dans le tableau 8.

Paramètres	Cibles Optiques	Fissuromètres
Précision de mesure	$\pm 2$ mm	$\pm 0,25\%$ de l'étendue de mesure
Dépouillement par	Géomètre	Spécialiste
Durabilité	Acquisition simple mais post-traitement demandant un travail spécialisé	Travail spécialisé, Reprise des mesures par une autre entreprise difficile
Information principale	Convergence (fissuration) et tassement	Fissuration
Temps de mesure	Dizaines de minutes	Quelques secondes
Coût par mesure	Moyen	Elevé
Robustesse et vulnérabilité	Opération possible seulement dans de bonnes conditions météo	Mesures en mode continu

Tableau 8: Avantages et désavantages des Cibles optiques et Fissuromètres.

## 7. CONCLUSION

Le présent article a pour objectif la mise en relief des prestations topographiques dans les différentes phases de la réalisation du tunnel des Oudayas, la présentation et la comparaison des deux systèmes de monitoring utilisés pour le suivi de la stabilité du tunnel ainsi que du bâtiment historique.

La première partie a été abordée pour les raisons suivantes :

- Le rôle primordial de la topographie dans l'orientation des travaux de réalisation du tunnel.

Dans la deuxième partie nous avons mis l'accent sur les deux méthodes d'auscultation : topographique et physique, nécessaire pour assurer l'avancement des travaux et garantir la stabilité du monument historique.

L'étude expérimentale avait pour objet la comparaison des mesures obtenues par les deux systèmes de monitoring (les fissuromètres et les cibles optiques). A l'issue de cette expérimentation et en se basant sur une comparaison visuelle et une analyse statistique, il s'est avéré que les deux méthodes sont complémentaires et donnent en moyenne les mêmes résultats.

## Références bibliographiques

[7] **Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : PZ QSA MSG 001, Manuel du système de gestion intégré qualité sécurité environnement, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM X E PA POP XX 000 GG 004, Gestion de la documentation interne et externe, Rabat.

[8] **Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-PA-POP-XX-000-GG-005, Gestion des non-conformités, Rabat.

[9] Topométrie 1, détermination des canevas des polygones

[10] **Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-PA-PE-00-00-PAQ-001, Plan d'Assurance Qualité (PAQ), Rabat.

[11] **Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM E PA PE 20 00 PEX 010, Procédure d'auscultation des tunnels, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM E SA PE 20 00 PEX 010, Procédure de monitoring et auscultation en souterrain, Rabat.

**Dunnicliff J. (1994)**, Geotechnical instrumentation for monitoring field performance

[12] **E. Delahaye, g.H. (1998)** : Les ouvrages de soutènement : guide de conception générale. Service d'études techniques des routes et autoroutes.

[13] **Ajerame M.M.** : Méthodes statistiques, département des statistiques, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : Procédure d'auscultation des tunnels routiers, F. Emerrouni et F. Houssaini, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : Travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès, F.Elmerrouni, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : Procédure d'auscultation des bâtiments historiques, F. Elmerrouni, Rabat.

**Pizzarotti** Maroc, chantier Tunnel des Oudayas : Rapport de mise en place Auscultation, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-X-E-SA-REL-BH-000-TS-001, BH – Monitoring Bâtiments Historiques, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-PA-PL-17-00-DEF-101, Plan de définition – BH – Système de monitoring, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-SA-PL-17-00-REC-013, BH – Monitoring préliminaire, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-SA-PL-17-00-REC-014, BH – Système de monitoring – 1/2, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-SA-PL-17-00-REC-015, BH, Système de monitoring, 2/2, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès TORM E SA PE 17 00 MTH 016BH, Système d'auscultation, Définition des valeurs de seuil

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-SA-PE-17-00-MTH-017, BH, Système d'auscultation, Interprétation des mesures de zéro, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-PA-PE-20-00-PEX-039, Procédure d'installation des inclinomètres, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM-E-PA-PE-00-00-PAQ 002, Organigramme et responsabilités du contrôle externe, Rabat.

**Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg**, travaux de construction et d'équipement du tunnel des Oudayas et de ses voies d'accès : TORM E PA PLM XX 000 GA 001B, axe des ouvrages, plan général d'implantation, Rabat.

**I. Kotsis, S. Karamitsos, V. Gikas (GR) : 3D Terrestrial scanning for tunnel surveying: hints and tips and comparison with conventional methods.**

## Références webographiques

[1] <http://www.sif-groutbor.ch/2008/techniques/paroi-prefabriquee.php>

[2] <http://www-twiki.polytech-lille.fr/pub/Main/HusseinMrouehAtelier3/tunnel-chap1.pdf>

[3] <http://www.frankigeotechnics.be/franki/ewcm.nsf>

[4] <http://www.soletanche-bachy.com/SBF/referencesb.nsf/Tech/jet.grouting>

[5] [http://www.112.public.lu/publications/bulletins/Brochure\\_69.pdf](http://www.112.public.lu/publications/bulletins/Brochure_69.pdf)

[6] <http://www.dtrf.setra.equipement.gouv.fr/pdf/pj/Dtrf/0002/Dtrf-0002212/DT2212.pdf>

<http://www.eurotunnel.com/frcP3Main>

<http://www.atm3d.com/v5/pdf/xyz107.pdf>

---

TS07E - Engineering Surveying

22/23

Mohamed OUHAMA, Mohammed ALAOUI, Tayeb TACHALLAIT et Yassine BAHIJ, MAROC

Contribution des Prestations Topographiques Dans L'étude Et le Suivi des Tunnels : Cas D'étude, Tunnel des Oudayas

FIG Working Week 2011

Bridging the Gap between Cultures

Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011

[http://www.roctest.com/modules/AxialRealisation/img\\_repository/files/documents/APN\\_Tunnels\\_Fr.pdf](http://www.roctest.com/modules/AxialRealisation/img_repository/files/documents/APN_Tunnels_Fr.pdf).  
[http://www.cms.fr/auscult\\_ouvrage.php](http://www.cms.fr/auscult_ouvrage.php).  
[http://www.leica-geosystems.fr/fr/Produits-Systemes-dauscultation\\_4211.htm](http://www.leica-geosystems.fr/fr/Produits-Systemes-dauscultation_4211.htm).  
[http://www.miretopo.com/pages\\_fr/auscultations.html](http://www.miretopo.com/pages_fr/auscultations.html).  
<http://www.revue-travaux.fr/?motscles=auscultation>.  
<http://www.structure-rehabilitation.fr/techniques-auscultation/impedance-mecanique.php>.  
[http://www.sfrp.asso.fr/IMG/pdf/14-Stefan\\_MAYER.pdf](http://www.sfrp.asso.fr/IMG/pdf/14-Stefan_MAYER.pdf).  
<http://rparticle.web/p.cisti.nrc.ca/rparticle/AbstractTemplateServlet?calyLang=eng&journal=cgj&volume=37&year=2000&issue=6&msno=t00-024>.  
<http://archives.lesechos.fr/archives/1993/LesEchos/16510-129-ECH.htm>.  
<http://www.auscult.fr/>.

## **CONTACT**

Mohamed OUHAMA,  
Mohammed ALAOUI,  
Tayeb TACHALLAIT

Filière des Sciences Géomatiques et Ingénierie Topographique, IAV Hassan II, Rabat-MAROC

Yassine BAHIJ  
Geomatic Topography Engineering, Rabat-MAROC