

Surveillance et instrumentation des monuments historiques

Marwan Al Heib, Thierry Verdel

► **To cite this version:**

Marwan Al Heib, Thierry Verdel. Surveillance et instrumentation des monuments historiques. 2. Séminaire régional "Science et technologie pour la préservation des monuments et des sites historiques", Nov 1996, Damas, Syrie. ineris-00971993

HAL Id: ineris-00971993

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00971993>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SURVEILLANCE ET INSTRUMENTATION DES MONUMENTS HISTORIQUES

Marwan AL HEIB, Thierry VERDEL

Laboratoire de Mécanique des Terrains, INERIS - Ecole des Mines
Parc Saurupt 54042 Nancy Cedex France
tél : (33) 03 83 58 42 89 / fax : (33) 03 83 53 38 49 / email : verdel@mines.u-nancy.fr

Deuxième Séminaire Régional :
Science et Technologie pour la Préservation des Monuments et des Sites Historiques
Damas, Syrie, 30 Novembre - 5 Décembre 1996

1 INTRODUCTION

Les sites et monuments historiques, comme tous les ouvrages naturels et humains, évoluent avec le temps du fait de l'action des éléments naturels ou de site. Cela amène donc la collectivité à se poser la question des moyens à mettre en œuvre pour assurer la pérennité des ouvrages qu'elle souhaite conserver dans son patrimoine et la sécurité des personnes susceptibles de les visiter.

En effet le risque principal auquel il faut faire face est celui de la « ruine » du site ou monument. Cette ruine résulte d'une instabilité qui peut brusquement mettre en péril l'édifice et ses visiteurs. La surveillance est le meilleur moyen d'obtenir à la fois un diagnostic juste et précis et de préconiser un traitement adapté au monument et à sa valeur historique.

L'auscultation doit toujours être une opération limitée dans le temps et bien ciblée suite à l'analyse du phénomène étudié. En outre la surveillance doit employer des techniques simples et de grande sensibilité.

2 RÔLES DE LA SURVEILLANCE

L'élaboration du diagnostic de stabilité d'un site ou d'un monument historique ne peut pas être terminée au stade des calculs analytiques ou numériques. Il est nécessaire de connaître l'évolution de la dégradation en fonction du temps pour pouvoir décider du degré d'urgence des travaux à réaliser. De plus il est rare que le traitement puisse être directement entrepris et il faut monter un dossier administratif et financier souvent complexe et les travaux peuvent s'étendre sur plusieurs années.

Pour toutes ces raisons, la mise en place d'un réseau de surveillance va permettre un suivi dans le temps du monument ou du site concerné et le déclenchement éventuel de mesures de première urgence en cas de dépassement de seuils d'alarme.

De plus, la surveillance de l'ouvrage permet d'assurer la sécurité vis-à-vis du public. Lorsque le site devient un établissement recevant du public la sécurité doit être assurée non plus seulement vis-à-vis de l'extérieur (conséquence d'une dégradation ou ruine sur l'environnement de l'ouvrage) mais aussi à l'intérieur pour pouvoir le cas échéant prendre les mesures vis-à-vis des visiteurs du site.

En effet, l'analyse de l'état de conservation et de stabilité ne fournissent qu'un bilan provisoire, souvent hypothétique, des conditions de conservation et de stabilité dans lesquelles se trouvent, à un moment donné, une structure, un ouvrage

souterrain ou un site historique. La surveillance permet de pallier les déficiences des observations et des calculs, pour les confirmer ou les affiner, elle permet d'éviter les incertitudes de diagnostic, de prévoir le comportement futur du monument ou du site et de se prémunir contre des risques potentiels [12].

Dans notre cas, la surveillance des monuments et des sites historiques est d'autant plus importante que l'on tient à assurer leur pérennité pour une période très longue, ce qui rend les méthodes de calculs de stabilité inaptes à rendre compte de leur comportement à long terme.

3 OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE

Les objectifs de la surveillance d'un monument ou d'un site historique peuvent être envisagés à trois niveaux :

- le premier consiste à prévoir au mieux si le site évolue, ou risque d'évoluer à terme vers un processus de ruine.
- le second niveau est opérationnel. Son objectif est de fournir une alarme qui prévienne de l'imminence de la ruine pour permettre de prendre les dispositions nécessaires ;
- le troisième niveau consiste à prédire le moment de la ruine.

En termes opératoires, ces mêmes objectifs peuvent être réalisés par les moyens suivants :

- enregistrer les valeurs et variations de paramètres "environnementaux" utiles pour la reconnaissance d'un site (niveau des pluies, température, humidité, niveau d'une nappe d'eau, niveau du sol, événements sismiques, ...);
- contrôler l'état de stabilité en prévenant le développement excessif de déformations du sol ou d'une structure, de pressions d'eau dans le sol, de surcharge dans les éléments structuraux d'un édifice, de l'ouverture de fissures, etc ;
- vérifier la validité des hypothèses de comportement, des mesures des propriétés des pierres, des roches et des sols, des modèles mécanistes réalisés sur ordinateur, etc ;
- contrôler l'adéquation des mesures de restauration, de protection, de renforcement ou de soutènement qui pourraient avoir été mises en place sur et autour du monument ou du site historique.

4 TYPES DE SURVEILLANCE

La surveillance d'un monument ou d'un site historique

peut être faite visuellement ou à l'aide d'instruments.

La surveillance visuelle consiste à visiter le site ou le monument à intervalles réguliers et à faire, à chaque fois, un nouveau bilan de l'état de conservation, voire, par conséquence, de l'état de stabilité. C'est une méthode peu sûre car elle repose sur des observations qualitatives et subjectives, souvent superficielles (fissuration, éboulements). Néanmoins, cette méthode a l'avantage d'être économique et suffisante quand la pérennité de l'ouvrage semble être assurée pour une longue période. Si cette surveillance est effectuée de façon méthodique, une aggravation de l'état du monument ou du site peut être détectée et une surveillance plus sophistiquée peut alors être envisagée.

La surveillance instrumentale consiste à placer, sur le monument ou le site, un certain nombre de repères ou d'appareils judicieusement choisis de façon à pouvoir suivre, continûment ou régulièrement, de manière quantitative, son comportement. Ce type de surveillance peut être nécessaire quand le comportement de l'ouvrage est visiblement en cours d'évolution, quand les causes d'instabilité potentielle n'ont pu être déterminées par les calculs et les observations visuelles, quand des modifications environnementales sont susceptibles d'apparaître (travaux proches, niveau de nappe d'eau variable, ...). Il est aussi requis pour des raisons d'accès dangereux ou impossible au site ou au monument (surveillance des falaises sous-minées d'accès difficile, des cathédrales dont l'accès aux niveaux supérieurs peut être malaisé et dangereux, ...).

5 PARAMÈTRES MESURÉS

Les mesures les plus utilisées en matière de surveillance sont les mesures de déplacements. Mais d'autres types de mesures peuvent être utiles telles que l'enregistrement des variations de la température, de la vitesse du vent ou encore du niveau d'une nappe d'eau, qui peuvent intervenir plus ou moins directement dans le comportement de l'ouvrage. Ces mesures doivent permettre de connaître le comportement d'un monument ou d'un site historique. Là encore, on peut lister les paramètres suivants [1] :

- ouverture ou glissement de fissures ou de joints ;
- déplacements relatifs (convergence, extension, basculement) de différents points de l'ouvrage ;
- déformation du sol et des ouvrages enterrés environnant le monument ou constituant le site historique (affaissement, subsidence) ;
- niveau d'eau souterraine, pressions et débits (ainsi que leurs variations) ;
- variations des contraintes dans le sol ou le massif environnant ;
- variations de la charge dans des éléments structuraux (arches, câbles, poutres, ...)
- vibrations produites par des émissions sismiques et microcosmiques (présence voisine de travaux d'exploitation ou d'aménagement du sous-sol ou du sol, trafic routier, etc...)

6 TECHNIQUES INSTRUMENTALES DE SURVEILLANCE

En règle générale, un système de surveillance est constitué de trois composants :

- un capteur ou un témoin attaché à la variable à mesurer ;
- un système de transmission des mesures pour permettre leur lecture ;
- un système de lecture, d'enregistrement et/ou d'interprétation des mesures.

D'autre part, trois exigences techniques doivent être respectées [2] :

- la sensibilité des mesures est impérative, compte tenu de l'ancienneté généralement très grande des monuments et des sites à ausculter, qui se traduit par une vitesse de déplacement souvent très faible (quelques centièmes de millimètres par an) ;

- la prise en compte des effets thermiques ou saisonniers constitue un corollaire de l'impératif précédent. Les appareils peuvent être sensibles à des variations de température et d'humidité et des appareils témoins peuvent être requis pour quantifier ces influences ;

- la fiabilité mécanique du matériel sur de longues périodes est indispensable, notamment s'il doit fonctionner dans un milieu agressif (atmosphère saturée, ruissellements d'eaux, vandalisme, ...).

Le mode de fonctionnement ou de mise en oeuvre d'un système de surveillance repose généralement sur l'une des quatre techniques suivantes [1] :

- les techniques mécaniques constituent souvent les plus simples, les plus économiques et les plus efficaces méthodes de détection, de transmission et de lecture. Les capteurs mécaniques de déplacement utilisent un fil (Invar), une bande ou une barre d'acier fixée en un point et liée à un système de mesure fixé en un autre point. C'est le principe des mesures de convergence (figure 1), des fissuromètres mécaniques ou encore des pendules ;

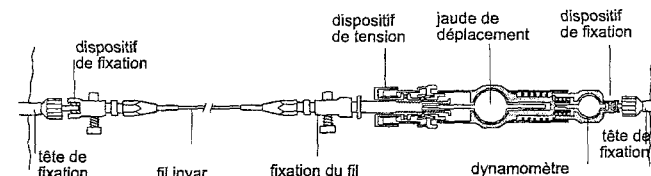


Figure 1: Le distomètre, un système mécanique très précis de mesure de convergence,

- les techniques optiques sont utilisées dans les méthodes de surveillance de type microgéodésique ou photogrammétrique visant à déterminer des profils d'excavation, à mesurer les mouvements d'un édifice, d'un site ou à évaluer les affaissements de surface. Parmi ces techniques, on peut citer l'emploi du théodolite associé à des cibles (plutôt adapté à la surveillance des sites), du telluromètre qui mesure le temps de parcours d'une onde pour aller d'un point émetteur à un point récepteur, tous deux solidaires de l'édifice, de l'ouvrage ou du site à étudier [3], du géodimètre constitué d'un point émetteur-récepteur et d'un point réflecteur dont on cherche à mesurer l'écartement, au moyen d'une source de lumière monochromatique (laser). La précision du géodimètre est supérieure à celle du telluromètre, elle est de l'ordre de 1 à 2 cm pour des distances variant entre quelques centaines de mètres et une quinzaine de kilomètres [3].

- les techniques hydrauliques ou pneumatiques sont utilisées pour mesurer des pressions d'eau, des charges transmises à un soutènement ou à des câbles, de variations des contraintes et des mesures de tassements des fondations. Dans tous ces cas, le mode opératoire consiste à mesurer la pression d'un fluide qui s'exerce à l'intérieur d'un diaphragme métallique, plastique ou en caoutchouc, installé dans le milieu à étudier. Le fluide est injecté dans la cellule jusqu'à ce que la pression soit suffisante pour contrebalancer la pression à mesurer. C'est le principe du vérin plat ou la cellule de Glotze.

- les techniques électriques sont probablement les plus utilisées actuellement car elles permettent notamment l'enregistrement indirect des données. On en trouve trois types principaux :

- les jauges de déformations électriques fonctionnent sur le principe selon lequel la résistance électrique d'un fil change avec sa déformation. Les jauges de déformation électriques sont alors installées de façon à être solidaires de la roche, l'acier ou la pierre dont on cherche à mesurer la déformation. Néanmoins, ce type de jauge présente des inconvénients dans la mesure où il est difficile d'assurer un bon contact entre la jauge et le matériau à étudier. Les déformations ne peuvent être mesurées que sur des longueurs faibles et où les effets de la température ne se font pas sentir ;

- les capteurs à corde vibrante, probablement les plus utilisés et utilisables dans l'étude des déformations des édifices et des cavités souterraines, fonctionnent selon le fait que la fréquence de vibration d'un fil tendu dépend de la contrainte de tension du fil. Ainsi, ces capteurs relient généralement deux points dont on cherche à mesurer la variation d'écartement, et un système électromagnétique fait vibrer le fil tendu entre ces deux points. On mesure alors la fréquence de vibration du fil. De nombreux appareils fonctionnent selon ce schéma comme des piézomètres, des cellules de pression du sol, des cellules de mesure de charge, des fissuromètres, des extensomètres, etc ... Ce type de capteurs a été utilisé notamment pour contrôler la déformation de la pyramide du Louvre ;

- les instruments à courant induit (self-inductance) mesurent le déplacement relatif d'un solénoïde lié à un point dans un autre solénoïde relié à un autre point. Ce déplacement provoque un changement de fréquence du courant induit par ces deux solénoïdes coaxiaux. Certains extensomètres et inclinomètres fonctionnent selon ce principe. Ces appareils peuvent effectuer des mesures multipoints (voir figure 2) sur des distances allant au delà de 30 mètres avec une précision de l'ordre de 0,01 mm. En principe, l'un des solénoïdes est attaché au massif dont on mesure la déformation et l'autre à un autre point du massif ou à un point de surface (ou de référence) par l'intermédiaire d'une canne à laquelle il est fixé. Le déplacement relatif de ces deux points est alors mesurable (figure 2).

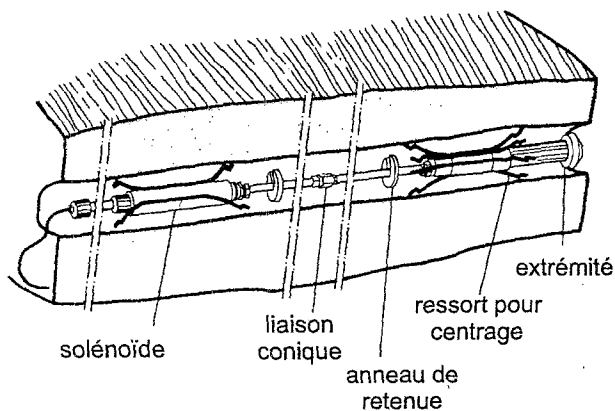


Figure 2 : Extensomètre multipoints fonctionnant selon le principe du courant induit (d'après Londe 1982).

Dans le domaine des monuments et des sites historiques, les techniques précédemment décrites sont plus ou moins applicables pour le contrôle des structures, des sols de fondations et des mouvements du sol ou du massif rocheux environnant le monument ou constituant le site historique lui-même.

6.1 Surveillance des structures

La surveillance des ouvrages historiques commence par un suivi de la partie visible, en particulier les bâtiments (murs, façades, fondations,). Certains appareils et leur principe correspondent à :

- des repères protégés et fixés sur les murs entre lesquels on cherche à faire des mesures d'écartement avec fil Invar, que l'on peut viser avec un appareil optique tel que le théodolite ou que l'on peut localiser sur des vues photogrammétriques de façon à mesurer leur écartement à chaque relevé ;
- des pendules directs ou inversés pour mesurer l'inclinaison d'une structure (figure 3). Les pendules peuvent être très précis (0,5 mm), ils sont utilisables à long terme et leur lecture peut-être automatisée [4] ;
- des extensomètres de surface reliant des points fixés à la structure. Ils permettent de mesurer le déplacement relatif de ces points, la déformation d'une structure (ex : Pyramide du Louvre) ;

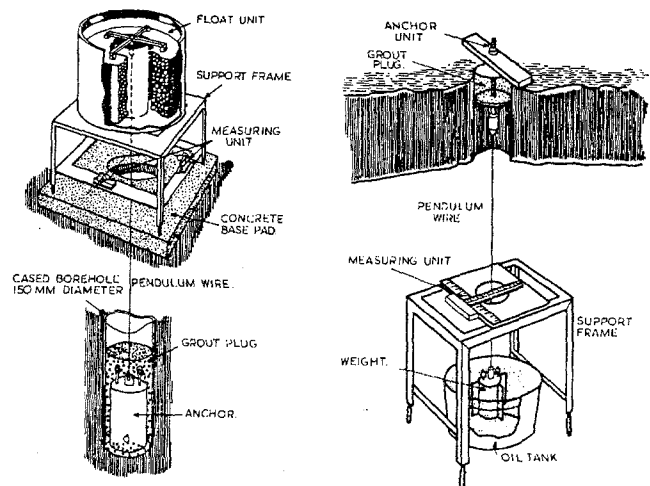


Figure 3 : Pendule inversé (à gauche) et pendule direct (à droite) de "Soil Instruments Ltd."

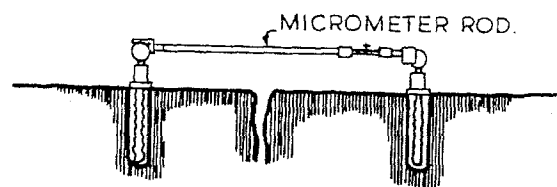


Figure 4 : Micromètre portatif

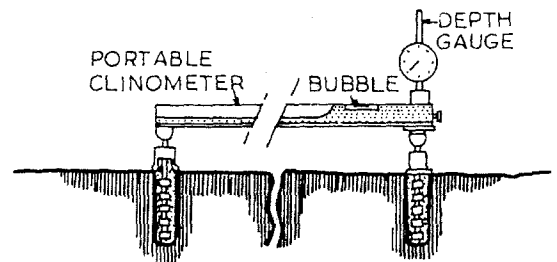


Figure 5 : Clinomètre portatif, [4]

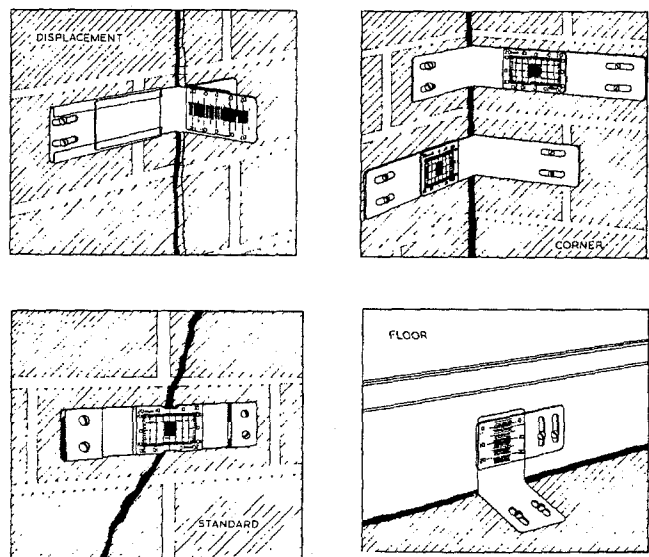


Figure 6 : Systèmes de mesure d'écartement de type "Vernier", [4]

- des micromètres, des extensomètres ou inclinomètres portables pour mesurer le mouvement de deux blocs d'une structure de part et d'autre d'une fissure (figures 4 et 5) ;
- des systèmes à vernier placés entre des fissures pour mesurer manuellement leur écartement (figure 6).

6.2 Surveillance de sol et de fondations

La surveillance des sols et des fondations consiste essentiellement à mesurer leur enfoncement, leur affaissement ou leur élévation. Pour ce faire, on a recours à quelques instruments dont :

- des repères de nivellements constitués d'une tête ancrée dans le sol ou à la base d'un édifice et dont on mesure les déplacements verticaux relatifs par des moyens optiques (figure 7) ;

- des repères de nivellement ancrés assez profondément dans un sous-sol supposé immobile et mesurant le déplacement vertical relatif entre la surface et le sous-sol "immobile", ou la déformation verticale du substratum dur (figure 8), indépendamment de la surface ;

- des systèmes de nivellements hydrauliques basés sur le principe des vases communicants et mesurant le déplacement vertical relatif entre des points de la surface du sol ;

- des extensomètres multipoints implantés plus ou moins profondément dans le sol et avec lesquels on mesure les déplacements verticaux relatifs de plusieurs points situés sur une même verticale, figure 9 ;

- des systèmes de nivellement électriques basés sur le principe du niveau à bulle du maçon, la bulle baignant dans un électrolyte, figure 10.

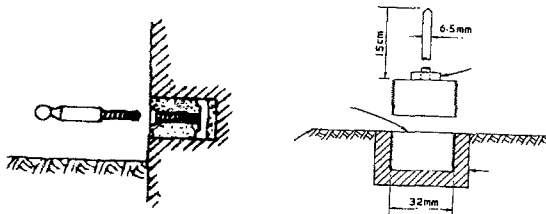


Figure 7 : Repère de nivellement (pour la mesure d'enfoncement de fondations à gauche ou le contrôle des routes ou surfaces pavées à droite)

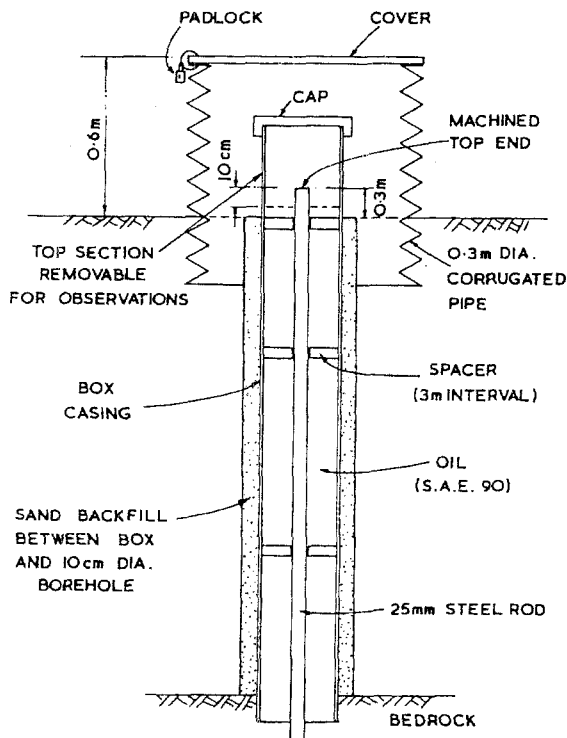


Figure 8 : Appareil mesurant le nivellement

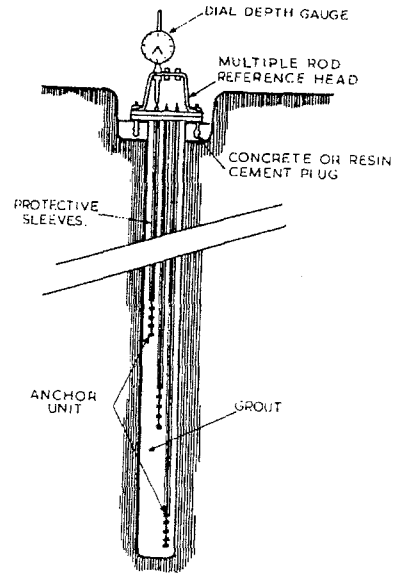


Figure 9 : Extensomètre multipoints

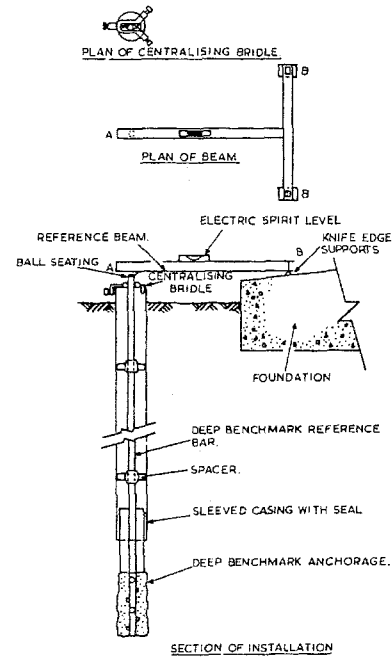


Figure 10 : Système de mesure d'enfoncement d'une fondation

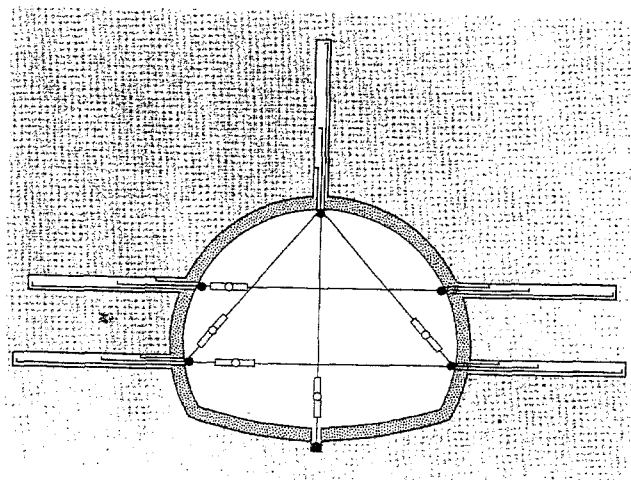


Figure 11 : Installation avec mesure de convergence entre les têtes d'extensomètres [4]

6.3 Surveillance des sols et massif rocheux environnants

Autour des excavations souterraines, on retiendra, hormis les fissurimètres et convergencemètres [6] destinés à mesurer des déplacements relatifs entre deux points de la surface de l'excavation ou deux points de part et d'autre d'une fissure, l'utilisation des extensomètres multipoints pour mesurer la déformation du massif rocheux sur une grande distance autour de l'excavation et dans toutes les directions, figure 11.

On pourra utiliser aussi des cellules pressiométriques [7] pour calculer les contraintes in-situ, ou les pressions exercées sur les parois ou sur les structures qui soutiennent l'excavation.

En ce qui concerne la surveillance des pentes et talus, les méthodes géodésiques sont les plus courantes et sont satisfaisantes pour détecter des mouvements de terrains de l'ordre de 5 mm par an : sur la surface d'un talus, un réseau de points de mesure est installé (cibles optiques) (figure 12), on mesure alors, à intervalles réguliers, le déplacement de ces points à partir de points de référence présumés stables et installés sur les abords du talus. Le géodimètre peut être un appareil efficace pour ce genre de surveillance selon la disposition du réseau. Les méthodes optiques par triangulation peuvent par contre être laborieuses et coûteuses.

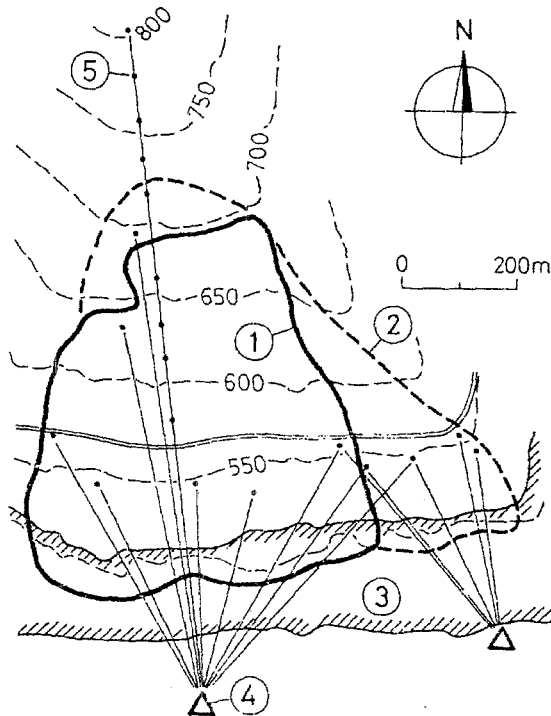


Figure 12 : Schéma de contrôle géodésique du glissement de terrain de "Recice" [5]. 1) limite de l'ancien glissement ; 2) délimitation de la zone du glissement potentiel ; 3) réservoir à surveiller ; 4) repère sur le talus stable ; 5) points de contrôle

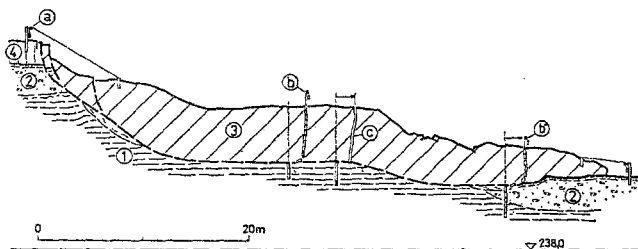


Figure 13 : Station complète pour la surveillance d'un glissement de terrain [5]. a) extensomètre à fil ; b) sondage test avec indicateur de plan de cisaillement ; c) trou de sondage avec instrument de mesure de pression interstitielle

Comme le montre la figure 13, d'autres méthodes de contrôle peuvent être ajoutées à la surveillance géodésique dont l'emploi d'extensomètres, de sondages tests pour indiquer une surface potentielle de rupture par cisaillement, ainsi que des inclinomètres, des piézomètres et des stations de nivellement.

7. ANALYSE DES MESURES ET CHOIX D'UNE MÉTHODE D'ALARME

On distingue deux méthodes pour réaliser une surveillance à partir des mesures in situ : la méthode du seuil et la méthode du gradient [8].

La méthode du seuil consiste à déterminer une valeur de paramètre mesuré, un seuil, à partir duquel la ruine est inévitable ou très probable à brève échéance. Cette méthode est extrêmement simple à mettre en œuvre, mais elle souvent écartée car elle nécessite, pour la détermination du seuil, une connaissance longue et quantitative du comportement de l'ouvrage pendant une grande période de son histoire, ce dont on dispose rarement.

La méthode du gradient repose sur des considérations générales concernant l'évolution d'un phénomène (figure 14). Lorsqu'un ouvrage est devenu instable, le processus pouvant conduire à sa ruine s'accompagne généralement par des déformations lentes. L'approche de la ruine se manifeste ensuite par une accélération souvent inéluctable des mouvements. La méthode du gradient ne se base pas sur la valeur atteinte par les déplacements mais sur l'évolution antérieure. Elle demande donc la mise en place d'un dispositif de contrôle capable de mémoriser l'histoire du site.

Grâce à des méthodes d'analyses de données (régression linéaire ou multiple, analyse discriminante, ...), on peut déterminer si la pente de la courbe est positive ou négative, donc si cela correspond à une accélération ou un ralentissement des mouvements mesurés.

En fonction de cette analyse, une décision peut être construite. Cette décision se traduira par une intervention sur le site accompagnée par les mesures et les traitements adaptés.

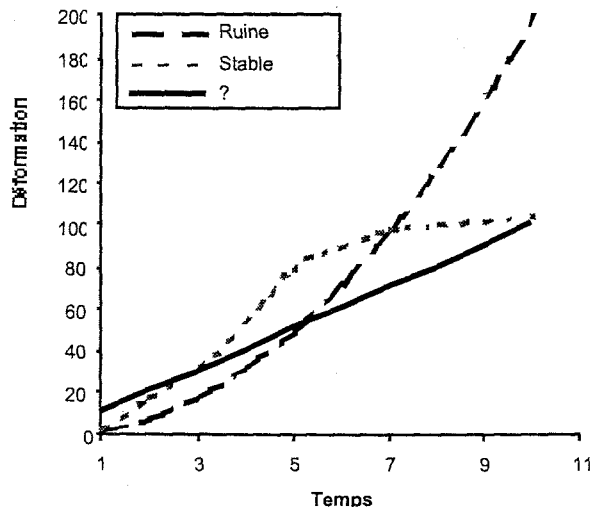


Figure 14 : Types de courbes de déformation en fonction du temps

8 CAS ÉTUDIÉS

8.1 Cas du château de Portes (France)

Le château médiéval de Portes souffre d'une dégradation très importante [9]. Les murs et les façades sont fissurés. Une carrière, située à proximité et ayant recours à des tirs à l'explosif pour l'exploitation, a été mise en cause. Pour analyser les causes de cette dégradation, une surveillance des mouvements du château a été établie pendant six mois à

partir de mesures fissurométriques et inclinométriques. 10 capteurs potentiométriques ont été installés pour mesurer l'écartement des lèvres de fissures apparentes, répartis en autant de points différents. La fréquence des mesures a été de 4 à 12 mesures par jour. Les mesures ont été réalisées automatiquement à partir d'une station (centrale d'acquisition des données). Les données ont été traitées et analysées mensuellement. Les résultats montraient une périodicité. Une corrélation existe entre les déformations et la variation de la température. Ce phénomène correspond à la respiration des fissures et est provoqué par les variations climatiques. Pour contrôler l'influence des tirs, une surveillance dynamique des vibrations a été effectuée à partir de géophones. L'ensemble des signaux ne montrait, au moment des tirs aucune déformation résiduelle.

8.2 Cas du château Teutonique de Malbork (Pologne)

Il s'agit du plus ancien et grand château en brique en Europe (1274-1280). Il est construit sur un talus proche d'une rivière (Nogat). Des fissures et des dégradations sont apparues et l'état du mur Ouest a été proche de l'éboulement [10]. Des solutions pour répondre à un état d'urgence ont été entreprises sans analyser les causes principales des dégradations. Enfin, à partir de 1988, des mesures de tassement des fondations ont été réalisées pendant 5 ans. Ces mesures ont montré l'évolution du tassement des fondations du mur en fonction de la variation du niveau de nappe (figure 15). La solution choisie a été la mise en place d'un nouveau système de fondations (micro-pieux) permettant de reprendre la charge des bâtiments du château et de la transmettre la charge dans une zone à l'abri de cette variation. Cette solution, radicale et sûrement chère, a permis d'éviter la ruine du mur et d'une partie principale du château.

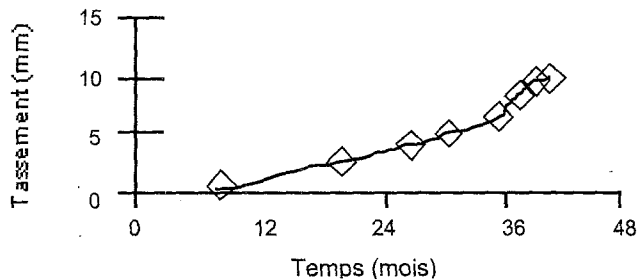


Figure 15 : Tassement du mur depuis 1988

9. CONCLUSION

L'élaboration d'un diagnostic n'est pas toujours une chose facile, surtout pour un monument ou un ouvrage ancien. La surveillance du comportement de l'ouvrage pendant une période courte (quelques mois, quelques années) reste négligeable par rapport à son âge. Mais les résultats de cette surveillance permettent de contrôler l'évolution et renforcer la vigilance. Ils permettent aussi de définir un seuil à partir duquel une décision pourra être prise ainsi que les mesures nécessaires pour éviter la ruine et donc la disparition à terme du monument.

Les aspects administratifs et sociaux sont très importants dès que la surveillance peut se traduire en termes d'alarmes. Il y a lieu de définir très précisément qui gère le système de surveillance, qui reçoit l'alarme et ce qu'il en fait. La concertation avec les différentes autorités administratives est ici primordiale et il importe de juger des conséquences des décisions prises trop tôt (alarme à tort) ou trop tard (défaut d'alarme) lorsqu'il s'agit de barrer une route ou de faire évacuer un immeuble. La notion de péril imminent ne s'appuie en fait sur aucune valeur précise de vitesse d'évolution ou de seuil atteint. L'interprétation des mesures de surveillance ne saurait donc se réduire à une simple mesure automatique. Elle doit absolument être associée à une expertise.

RÉFÉRENCES

- [1] Brady B.H.G. & Brown E. T. 1985. Rock Mechanics for Underground Mining. Ed. George Allen & UNWIN.
- [2] Schwartzmann R. 1990. Surveillance et Sécurité des ouvrages des Sites en Génie Civil et Minier. Séminaire Comett, Nancy 13 - 15 Juin. Laboratoire de Mécanique des Terrains - Ecole des Mines de Nancy.
- [3] El Oulabi A. 1985. Contribution de la microgéodésie, du nivellement de précision et de la photogrammétrie au contrôle des ouvrages d'art. Thèse de docteur - ingénieur en sciences physiques. Paris VI.
- [4] Hanna T.H. 1985. Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. Ed. Trans Tech Publications.
- [5] Zarura Q. & Menci V. 1982. Landslides and Their control. Ed. Elsevier Scientific Publ. Comp.
- [6] Schwartzmann R. 1986. Surveillance et télésurveillance d'anciennes exploitations. Symposium (Sécurité et Salubrité dans les mines et Carrières). Luxembourg.
- [7] Dunclicliff J. 1989. Geotechnical Instrumentation for monitoring Field Performance. Ed. Wiley.
- [8] Paquette Y. & Cotour P. 1993. Surveillance de la stabilité de pentes, talus ou excavations souterraines, Méthodes de prévision et d'alerte. Séminaire ITELOS (Instrumentation et Télésurveillance des Ouvrages et des Sites), Nancy 4-7 Octobre. Lab. de Méc. des Terrains - Ecole des Mines de Nancy.
- [9] Tritsch J.J 1993. Surveillance des mouvement du château de portes. Rapport Interne (INERIS)
- [10] Dembincki E. Odrobinski W. & Sanglerat G. 1995. Reprise en sous-œuvre du château des chevaliers Teutoniques de Malbork. Revue Française de Géotechnique N°72.
- [11] Londe P. 1982. Concepts and instruments for improved monitoring. J. Geotech. Engng Div., Am. Soc Civ. Engrs 108, 820-34.
- [12] Verdel T. Géotechnique et Monuments Historiques. Aspects méthodologiques. DEA. Ecole des Mines de Nancy, INPL, 1990.