

GÉOTECHNIQUE ET MONUMENTS HISTORIQUES : ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES

M.A. ALLAL
Institut de Génie civil
Université de Tlemcen.

RÉSUMÉ

Comme le rappelle clairement la Charte de Venise dans son article 2, «...la conservation et la restauration des monuments constituent une discipline qui fait appel à toutes les sciences et techniques qui peuvent contribuer à l'étude et à la sauvegarde du patrimoine monumental.»

La géotechnique, qui regroupe les multiples sciences et techniques consacrées à l'étude des sols et des roches, fait ainsi partie de ces disciplines pouvant contribuer, par l'emploi des outils nouveaux qu'elle utilise par ailleurs, à la préservation du patrimoine architectural et monumental de l'humanité ainsi que l'évolution de la recherche dans ce domaine.

Dans ce travail, nous avons choisi d'exposer en quoi consiste la géotechnique, quelles en sont la méthode et la finalité, et ce qu'elle pourrait apporter à la compréhension et à la résolution de certaines formes de dégradations des monuments historiques.

MOTS CLÉS

Géotechnique • Monuments historiques • Méthodologie • Pathologie.

1. Introduction

La géotechnique, une science «jeune», peut apporter aux problèmes de la conservation et de la restauration des monuments, ses méthodes et ses outils. De part son champ d'application habituel qui couvre l'art de creuser et de bâtir, elle peut, dans le domaine des monuments historiques, porter son action sur certains problèmes. En effet, les affaissements, les fissurations, les chutes de blocs etc. en particulier, et l'étude de la stabilité d'ouvrages anciennement construits et/ou de terrains en évolution critique en général, relèvent tout à fait de la spécialité en question.

L'intervention géotechnique peut s'attacher à l'étude du comportement mécanique global d'un monument et de son environnement immédiat, ainsi qu'à leurs interactions.

S'il s'agit d'étudier un édifice, la stabilité de la structure et l'interaction édifice-sol sont les préoccupations du géotechnicien ; s'il s'agit d'un ouvrage souterrain, la stabilité des terrains encaissants l'intéresse ; s'il s'agit d'un édifice qui repose au pied ou au sommet d'un talus ou d'une falaise, c'est la stabilité de ce talus ou de cette falaise qui attire principalement son attention. Puis, ayant ainsi défini succinctement ses préoccupations, toute l'action du géotechnicien s'oriente vers l'établissement d'un "diagnostic", qui est son maître mot. Pour cela, il lui faut tenter de répondre à certaines questions, dont les suivantes sont les plus importantes :

- Dans quel état de conservation se trouve le monument ou le site ?
- Quel est son état de stabilité ?
- Quelle est son évolution possible dans le temps ?
- Quels sont les risques pour la conservation du monument, du site et pour les visiteurs ?
- Quelles sollicitations peut-il encore supporter (déformations admissibles, etc.) ?
- Quels sont les remèdes possibles ?

Ces questions, non exhaustives, sont finalement au cœur de la démarche du géotechnicien. En y répondant successivement, il parcourt une méthodologie d'étude devenue classique en géotechnique et que l'on peut schématiser comme suit :

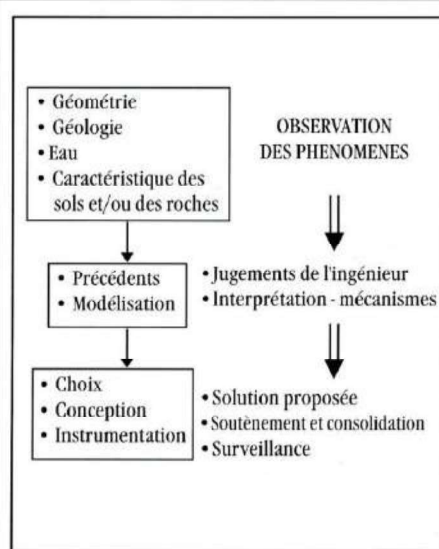


Figure 1 : Vue schématique de la méthodologie des études géotechniques.

De cette méthodologie, il ressort que trois étapes fondamentales caractérisent la démarche du géotechnicien.

2. Première phase de la méthode

La première, qui rassemble l'ensemble des observations, est la phase descriptive. C'est cette étape qui, dans le cas des monuments, permet notamment de déterminer, de chiffrer ou de représenter l'état de conservation.

Elle consiste à relever la géométrie du monument et de son environnement, à repérer la géologie (types des pierres de construction, des roches et des sols encaissants, lithologie,...) à caractériser les pierres, les roches, les terrains par des tests simples et des essais de laboratoire (module d'Young, cohésion, angle de frottement, résistance à la compression et à la traction, perméabilité...), à noter les événements structuraux (discontinuités naturelles ou mécaniques, fissures, éboulements...) ainsi que la pré-

sence ou non d'eau dans un voisinage proche du monument ou dans le site.

Ces observations sont généralement rassemblées sous la forme de plans et de tableaux de chiffres dans le cadre de cartes géotechnique localisées. De telles cartes permettent aux responsables de localiser des zones à priori dangereuses ou des zones d'intérêt pour une étude plus poussée. Elles constituent un premier bilan uniquement «visuel» qui permet d'envisager des hypothèses (ex: tassements différentiels dus à des terrains de fondation hétérogènes), de lancer des investigations sur les phénomènes rencontrés afin de guider les études et recherches ultérieures.

D'autre part, ainsi exécutés, ces plans répondent aux objectifs généraux énoncés par le guide de l'Unesco relatif à la cartographie géotechnique (Antoine et Fabre, 1980) :

- Rassembler et représenter l'information nécessaire pour évaluer les caractéristiques géotechniques dont la connaissance est indispensable dans le triple domaine de l'aménagement régional, de la construction et de l'exploitation minière,
- Permettre la prévision des modifications des conditions géologiques que risquent d'entraîner les travaux et suggérer les mesures préventives nécessaires,
- présenter l'information géologique et géotechnique d'une façon accessible aux professionnels qui l'utilisent et qui ne sont pas forcément géologues (ou géotechniciens).

3. Deuxième phase de la méthode

La deuxième étape de la méthodologie du géotechnicien est une phase d'interprétation des observations rassemblées sur la carte géotechnique préalablement constituée et éventuellement complétée par des essais spécifiques ou des mesures *in situ*. Dans le cas des monuments, cette étape permet de caractériser l'état de stabilité actuel du monument. Le géotechnicien cherchera en effet, avec les moyens dont il dispose à :

- Préciser notamment l'état de fissuration du

monument par des examens endoscopiques minutieux,

- Mesurer la dégradation des matériaux rencontrés par des méthodes ultrasoniques par exemple ou des outils comme le marteau de Schmidt qui permettent de quantifier, d'une façon ou d'une autre l'intégrité de ces matériaux,

- Evaluer le comportement in situ des matériaux vis à vis de l'eau par des mesures de gonflement (pour certains argiles) ou de porosité, par exemple,

- Déterminer l'état de contrainte dans les structures du monument avec des outils comme le vérin plat, des cellules pressiométriques ou des méthodes de surcarottage, etc.

A cela s'ajouteront éventuellement des mesures géophysiques pour repérer la présence d'éventuelles cavités invisibles de l'extérieur comme des karsts ou des défauts structuraux du point de vue géologique qui pourraient influencer le comportement mécanique du creusement (Verdie, 1993).

Avec tous ces éléments à sa disposition, le géotechnicien mettra ensuite en œuvre une panoplie de calculs qui lui permettront de préciser l'état de contrainte dans et autour du monument puis de le confronter à ce que les matériaux présents sont en mesure de supporter.

Que ce soit par des calculs de charge sur sols ou sur fondations, des calculs de contraintes résolues par modélisation numérique, couplés à des calculs de capacité portante des sols ou des fondations ou par des calculs de résistance des matériaux, et avec l'expérience d'autres cas dont la typologie, la morphologie ou les symptômes sont relativement semblables, il tentera de déterminer si le monument est menacé de ruine ou s'il est dans un état de stabilité actuellement satisfaisant. On n'oubliera pas de vérifier les tassements des couches de sols compressibles, le gonflement des sols expansifs et/ou la stabilité des talus en pente.

En raison de la complexité géométrique, physique ou géologique des ouvrages bâtis, des ouvrages souterrains ou des roches et sols qui les environnent, du fait également des problèmes

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Antoine p. et Fabre D. : *Géologie appliquée au Génie-civil*. Ed. Masson, Paris, 1980.
- [2] Brady B.H.G. et Brown E.T. : *Rock Mechanics for underground mining*. Ed. George Allen & Unwin, London, 1985.
- [3] Hanna T.H. : *Field instrumentation in geotechnical Engineering*. Ed. Trans Tech Publications, 1985.
- [4] icosos (International Council On Monuments and Sites). *Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites*, 1966.
- [5] Imam H.F, Saleh F., Helal H., Abdallah T., Verdel T. et Abdel Wahab T. : *Environmental protection of egyptian cultural heritage. Rapport pour la Banque mondiale*. Université du Caire, Le Caire, 1992.
- [6] Martin P. : *Essai sur la géotechnique*. Ed. Masson, Paris, 1976.
- [7] Parent M. : *Problèmes de la restauration avec l'environnement sociologique et culturel. Actes d'un colloque sur les «Restaurations françaises et la Charte de Venise», P. 10-19*. Ed. Caisse nationale des monuments historiques et des sites, Paris, 1977.

de résolution mathématique que posent les théories de comportement proposées pour l'étude de ses structures, ouvrages, sols et massifs rocheux, l'analyse de stabilité ne peut être assez correctement estimée que par l'utilisation d'outils logiciels devenue courante avec le développement de l'informatique. Actuellement, on en trouve principalement trois types :

- Le premier repose sur les méthodes de calcul à la rupture (équilibre limite) qui donnent, par le biais d'un coefficient de sécurité F , une idée de l'état d'équilibre d'un massif par rapport à un équilibre limite caractérisé par $F=1$.

- Le deuxième type repose sur les méthodes de modélisation des milieux continus, parmi lesquelles on trouve essentiellement la méthode des éléments finis. Ces méthodes permettent de simuler le comportement d'un milieu continu (ou pseudo-continu) soumis à des sollicitations externes connues et/ou à l'action de la gravité. Par leur principe, elles utilisent des modèles théologiques (élasticité, plasticité, élastoplasticité, viscoplasticité...) qui relient les contraintes aux déformations, ce qui fait leur intérêt.

- Le troisième type repose sur les méthodes de modélisation des milieux discontinus, au nombre desquelles on compte notamment la méthode des éléments distincts. Ces méthodes sont plus récentes et permettent essentiellement l'étude du comportement des massifs rocheux fracturés.

L'intérêt de ces méthodes de modélisation pour caractériser l'état de stabilité réside dans la possibilité de visualiser sur ordinateur leur comportement global et local de façon réaliste (ou supposée telle). Dans une méthode par éléments finis, on localisera ainsi aisément les zones soumises à de fortes contraintes, les zones soumises à des fortes déformations, éventuellement les zones en rupture. Dans une méthode par éléments distincts, on visualisera plutôt le comportement d'une structure après rupture, pour déterminer si elle se stabilise ou si elle évolue vers la ruine.

Ces méthodes sont susceptibles d'apporter à l'étude des monuments historiques une nouvelle façon de comprendre et d'interpréter certains phénomènes de dégradation qu'on y rencontre.

4. Troisième phase de la méthode

Le diagnostic porté sur un site ou un monument historique ne peut pas être terminé au stade des calculs analytiques ou numériques. En effet, l'état de conservation et l'état 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. Pour pallier les déficiences des observations et des calculs, pour les confirmer ou les affiner, pour éviter les incertitudes de diagnostic, prévoir le comportement futur du monument ou du site et se prémunir contre des risques hypothétiques, il faut avoir recours à des méthodes et des techniques de surveillance.

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 décrites auparavant souvent inaptes à rendre compte, de façon certaine, de leur comportement à long terme.

La surveillance d'un monument ou d'un site historique peut être faite visuellement ou à l'aide d'instruments.

La surveillance d'un monument ou d'un site historique peut être menée avec quatre objectifs principaux (Brady & Brow, 1985) :

- 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

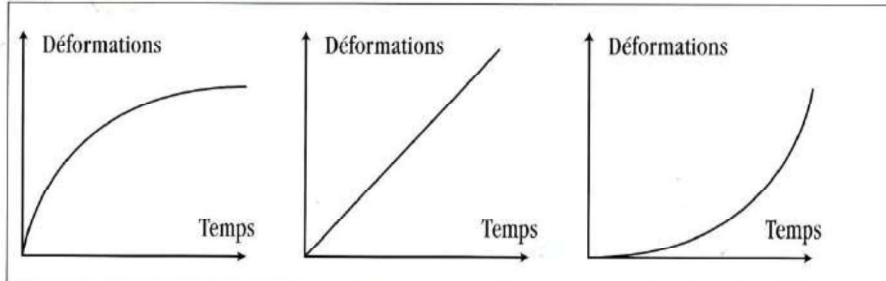


Figure 2 : Types de courbes de déformations en fonction du temps :

- à gauche, évolution prévisible vers la stabilité
- au milieu, ambiguïté sur l'évolution
- à droite, évolution prévisible vers la ruine.

soutènement qui pourraient avoir été mises en place sur et autour du monument ou du site historique.

D'un manière générale, la surveillance du comportement d'un monument ou d'un site historique passe par la mesure des grandeurs suivantes (Brady & Brow, 1985) :

- Mouvements tangentiels ou perpendiculaires d'une fracture ou d'un joint,
- Déplacements relatifs ou convergence de deux points appartenant à l'édifice ou à l'ouvrage historique,
- Déplacement se produisant à l'intérieur du sol ou d'un massif rocheux environnant le monument ou constituant le site historique,
- Déplacements de la surface du sol (affaissement, subsidence),
- Variations d'inclinaison le long d'un trou de sondage,
- Niveaux d'eau souterraine, pressions et débits (ainsi que leurs variations),
- Variations de contrainte normale en un point du sol ou du massif environnant,
- Variations de charge dans des éléments structuraux (arches, câbles, poutres...),
- Émissions sismiques et microsismiques,
- Vitesses de propagation d'onde.

Dans le cas des monuments et sites historiques, après l'installation des instruments de surveillance, une interprétation satisfaisante des mesures consiste à pouvoir détecter rapidement et sans ambiguïtés, toute évolution alarmante (en général une accélération des mouvements) du comportement du monument ou du site ; on peut résumer l'évolution possible d'un ouvrage ou d'un site par un regard sur les trois courbes de la figure 2, qui sont typiques (mais schématisée) de trois jugements différents portés sur l'évolution : une stabilisation prévisible, une ambiguïté, une ruine prévisible.

L'ensemble de ces informations depuis l'étude de l'état de conservation, de l'état de stabilité jusqu'au suivi du comportement d'un monument, permettra généralement au géotechnicien d'établir enfin un diagnostic complet sur celui-ci.

De là, il pourra aussi faire des recommandations pour des mesures de consolidation ou de

soutènement dont il a l'habitude et au besoin, les associer à un dispositif de surveillance.

5. Conclusion

La construction de tous les édifices ou de tous les ouvrages implique d'avoir choisi et aménagé un site, sélectionné et exploité des matériaux, établi des fondations... qui sont des actes spécifiquement géotechniques (Martin, 1976). Ceci vaut pour les réalisations contemporaines et vaut également pour les œuvres du passé, devenues monuments. Dès l'antiquité, il y avait donc des géotechniciens et particulièrement en Egypte où l'on compte près d'un tiers des plus célèbres monuments du monde (Imam et al, 1992). Selon leurs préoccupations et leurs objectifs, ces géotechniciens devaient très probablement posséder certaines connaissances dans ce qu'on appellerait aujourd'hui la géologie, la mécanique des sols et des roches, l'hydrogéologie ou l'hydraulique souterraine...

Ainsi, à leur manière, ils avaient réalisé une synthèse de ces disciplines parce qu'ils en avaient éprouvé le besoin pour l'objet de leurs travaux. Cette synthèse, c'est justement la Géotechnique qui, dans des définitions les plus récentes la concrétise de nouveau (Martin, 1976). Par cela, la géotechnique trouve une raison suffisante pour se pencher sur les témoignages de ces ancêtres géotechniciens. Mais c'est aussi, par son fort potentiel de développement qui en fait une science moderne, que la géotechnique peut réellement apporter au restaurateur ou à l'architecte en charge d'un monument, des points de vue, des méthodes ou des outils nouveaux et novateurs dont le but est avant tout de toujours mieux comprendre et agir. ■

[8] Rossi P.P. : *Diagnostic analysis of the static conditions of some italian monuments Symposium on Geotechnical Aspects of Restoration Works on Infrastructures and Monuments*, Bangkok p.41-54 Ed. A.A. Balkema, Rotterdam, 1988.

[9] J. Taralon : *Evolution des doctrines en fonction de l'évolution des techniques, Actes d'un colloque sur "Les restaurations Françaises et la Charte de Venise"*, p.31-37 Ed. Caise Nationale des Monuments Historiques et des Sites, Paris 1977.

[10] T. Verdel : *Géotechnique et Monuments Historiques : Méthodes de modélisation appliquées à des cas égyptiens*. Thèse de Doctorat de l'I.N.P.L, Ecole des Mines de Nancy (France).

[11] T. Verdel et O. Colin : *Préservation et Protection des Monuments et Sites Historiques, méthodes de soutènement Rapport d'étude*, Ecole des Mines de Nancy, Nancy 1989.

[12] Q. Zarura & V. Mencl : *Landslides and their control*, Ed. Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1982.