

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

La norme sur les missions d'ingénierie géotechnique, clé de voûte du management des risques géotechniques de tout projet

Geotechnical missions standard, the foundation of risk management for a project

Robert J.
Arcadis France

RÉSUMÉ : Des ouvrages à construire de plus en plus complexes, des terrains disponibles de moins bonne qualité géotechnique, dans la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) une forte occupation du sol et du sous-sol par des ouvrages de plus en plus vulnérables, un voisinage plus sensible, tels sont les défis auxquels doit faire face l'ingénierie géotechnique pour satisfaire l'objectif fondamental du maître d'ouvrage qui est de réduire les risques techniques. Depuis 2000, la norme sur les missions d'ingénierie géotechnique a permis de définir une méthodologie d'intervention aussi bien pour la conception du projet que sa réalisation : ses révisions en 2006 et 2013 ont eu pour objectif de faciliter son application lors du déroulement d'un projet, condition indispensable pour assurer un bon management des risques géotechniques.

ABSTRACT: New constructions are more and more sophisticated, in a geotechnical context usually unfavourable and in an environment more and more sensitive. So, for the success of a project, it is necessary to reduce the geotechnical risk. As the soil conditions are not visible, complex and with a possibility of time-dependant modifications, the geotechnical risk reduction needs a geotechnical engineer intervention at each step of the design and during the construction to insure a good adaptation of the project to the actual soil conditions : it is the main aim of the geotechnical missions standard.

MOTS-CLÉS : norme, missions, zone d'influence géotechnique, maîtrise des risques

KEY WORDS: standard, geotechnical mission, risk management

1 INTRODUCTION

Tout projet de construction ou d'aménagement comporte des risques qui se sont amplifiés au fil des années. Ces risques, synonymes d'une maîtrise souvent difficile du délai de réalisation et du coût final de l'ouvrage, résultent de l'évolution défavorable de plusieurs facteurs : délais de conception et de réalisation de plus en plus courts, ouvrage de plus en plus complexe mettant en jeu des méthodes de construction sophistiquées qui s'adaptent mal aux incertitudes et aléas, environnement de plus en plus sensible à toute perturbation. Ce constat justifie l'intervention d'un nombre croissant de spécialistes, d'où des problèmes d'interfaces plus nombreux et une coordination plus difficile.

Devant cette complexité croissante des projets, le rôle joué par la géotechnique devient primordial car les exigences requises sur la qualité du sous-sol sont de plus en plus importantes notamment pour les fouilles profondes et les conditions de fondations. Le sous-sol étant non visible, complexe et évolutif dans le temps, la géotechnique permet de maîtriser au mieux l'inconnu en accompagnant le projet tout au long de sa conception et de sa réalisation par un enchaînement pertinent des missions conforme à la norme NF P 94-500.

2 SPÉCIFICITÉS DE LA GÉOTECHNIQUE

La géotechnique, discipline complexe qui étudie le comportement des terrains en relation ou non avec des ouvrages, s'appuie sur différentes sciences de la terre : géologie, hydrogéologie, mécanique des roches et des sols, géodynamique, rhéologie des géomatériaux, géochimie.

Sa première spécificité est d'étudier un milieu naturel non visible, donc mal connu : quelle que soit l'importance des investigations réalisées, la part du connu sera toujours faible par rapport au non reconnu. Ainsi, les observations et relevés faits lors de la réalisation de l'ouvrage sont capitaux car bien plus nombreux et mieux répartis que les investigations faites lors de sa conception. Sa deuxième spécificité est d'étudier un

milieu complexe. Le sous-sol est constitué de formations ni homogènes, ni isotropes, ni élastiques : elles sont nombreuses et de disposition spatiale aléatoire, une même formation pouvant présenter des lithologies très différenciées (voir Figure 1). Le resserrement du maillage des sondages permet de mieux approcher la complexité de la structure du sous-sol qui se prête mal à une modélisation toujours simplificatrice et réductrice, alors que le problème qui survient lors des travaux est souvent dû à une hétérogénéité locale non décelée à temps.

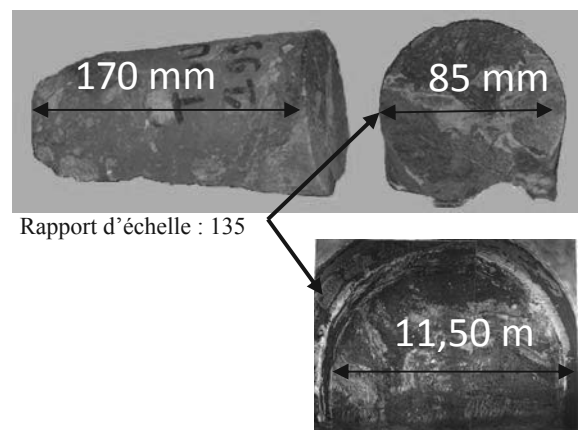


Figure 1 : Hétérogénéité à l'échelle de l'échantillon et du tunnel

Sa troisième spécificité est l'évolution possible de la constitution du sous-sol au fil du temps, évolution difficile à appréhender lors d'une étude limitée dans le temps. Les principaux facteurs d'évolution dans le temps sont :

- les perturbations apportées par l'homme : exploitation de matériaux, réalisation d'ouvrages souterrains, pollution de certaines formations, remblaiement de fouilles ultérieurement non détectables ;

- les phénomènes naturels liés à l'érosion et aux circulations d'eau, mettant en jeu la stabilité de versants (voir Figure 2) ;
- les secousses sismiques dont les effets sur certains terrains peuvent provoquer la perte de consistance ;
- la fluctuation des nappes contenues dans les formations, qu'elle soit naturelle (influence de la pluviométrie) ou artificielle (pompages industriels, création de barrages) ;
- le gonflement ou le retrait des terrains argileux ;
- la dissolution par l'eau de certaines formations (gypse, calcaire ...), créant un réseau karstique évolutif ;
- les entrainements de fines sous l'effet d'écoulements naturels ou non.



Figure 2 : Instabilité de versant due aux circulations d'eau

Face à cette complexité, le géotechnicien a pour principale arme les investigations ponctuelles, d'où le danger des interpolations entre sondages face aux anomalies locales difficilement détectables tels le puits perdu, le talweg fossile, la carrière.

3 SPÉCIFICITÉS DE L'OUVRAGE À CONSTRUIRE

Les principales spécificités de l'ouvrage à construire qui influent sur sa conception et l'interaction sol-structure sont :

- son emprise au sol et les charges qu'il apporte ;
- la sensibilité de sa structure vis à vis des incertitudes géotechniques (poussées, tassements différentiels par exemples) ;
- son implantation et sa profondeur dans le terrain ;
- ses phasages de construction qui imposeront des études d'interaction à chaque étape, même de courte durée.

L'optimisation des méthodes de construction nécessite l'étude de l'influence des incertitudes géotechniques, principalement en termes de délais de réalisation et de coût final de l'ouvrage : il faut choisir les méthodes les moins sensibles à ces incertitudes pour éviter des situations de crise. La méthode sophistiquée qui serait mise en échec par une variation de certains paramètres géotechniques est à proscrire si cette incertitude n'a pas pu être levée.

La méthode de construction elle-même peut avoir une influence sur les caractéristiques géotechniques du site : par exemples amélioration de sols, remontée de la nappe phréatique par effet de barrage, passage aux caractéristiques résiduelles par apparition de grandes déformations. Quelle que soit la méthode de construction retenue, les possibilités d'adaptations en cours de travaux doivent être étudiées, ainsi que leurs conditions de mise en œuvre : observations à faire, moyens de contrôle, dispositions conservatoires. La bonne maîtrise des méthodes de construction retenues suppose une vérification en continu de la bonne concordance entre prévision et réalité du comportement de l'ouvrage (auscultations), ainsi que de l'efficacité des procédés utilisés (pompages, soutènements, terrassements, améliorations de sol)

4 SENSIBILITÉ DE L'ENVIRONNEMENT

Pour mieux cerner les conséquences potentielles de la construction d'un ouvrage sur son environnement tant en surface qu'en sous-sol, la première étape est de définir sa zone d'influence géotechnique (ZIG). Sa ZIG correspond au volume du massif au sein duquel il y a interaction entre d'une part le sol et les avoisinants, d'autre part l'ouvrage du fait de sa réalisation et de son exploitation. Sa forme et son extension sont spécifiques à chaque site (contexte géotechnique, avoisinants) et à chaque ouvrage à construire (géométrie, phasage et méthodes d'exécution, conditions d'exploitation). Par exemple, un parking souterrain qui coupe un talweg fossile aquifère a une ZIG très étendue dans la direction du talweg (effet barrage).

La deuxième étape est l'identification de chaque avoisinant implanté dans la ZIG et l'analyse de sa vulnérabilité qui dépend des caractéristiques géotechniques des formations qu'il mobilise et de sa nature (structure, fondations). Cette analyse peut conduire à concevoir des dispositions préventives concernant l'avoisinant (reprises en sous œuvre, amélioration des sols) ou l'ouvrage à construire (adaptation locale de la méthode de construction), et éventuellement des dispositions correctives si le comportement réel du massif ou de l'avoisinant n'est pas conforme aux prévisions.

La vulnérabilité de l'environnement est de plus en plus importante au fil des années car d'une part il est de plus en plus dense et d'autre part il est constitué par des ouvrages vétustes (défauts de maintenance) ou complexes (nombreux sous-sols, grandes portées, fortes charges concentrées). Il est donc primordial de mettre en place une démarche conduisant à une maîtrise des risques géotechniques afin de limiter leurs conséquences potentielles sur l'environnement.

5 CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE LA NORME VERSION 2013

Face aux risques évoqués précédemment, la meilleure réponse est l'application rigoureuse de la norme NF P 94-500 sur la classification des missions types d'ingénierie géotechnique. Le reconnu en géotechnique est toujours modeste et les risques géotechniques dépendent non seulement des caractéristiques des terrains mais également de celles de l'ouvrage, de sa méthode de construction et de son environnement. Le projet sans risque n'existant pas, la maîtrise des risques géotechniques s'obtient par un enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique tout au long des étapes de conception et de réalisation du projet, en coordination avec les missions de maîtrise d'œuvre générale.

Le retour d'expérience sur l'application de cette norme depuis 2000 permet de dégager quelques dysfonctionnements :

- Le non enchaînement des missions alors qu'il est obligatoire ;
- La réalisation d'une mission partielle sans que son complément soit fait ultérieurement ;
- Le contenu de la mission non adapté à l'état d'avancement du projet, parfois dû à une correspondance non évidente entre missions d'ingénierie géotechnique et phases de conception de la maîtrise d'œuvre générale.

L'objectif de la révision 2013 de la norme a été de faciliter son application en réduisant le nombre de missions pour faciliter leur enchaînement et en les calant au plus près des phases de maîtrise d'œuvre générale. Côté maître d'ouvrage et sa maîtrise d'œuvre, il y a trois missions à enchaîner de préférence par la même ingénierie géotechnique pour une plus forte valeur ajoutée dans la recherche des optimisations du projet tout en assurant une bonne maîtrise des risques.

L'étude géotechnique préalable G1, qui comprend deux phases :

- La phase étude de site ES, qui définit un modèle géologique préliminaire du site et ses principales caractéristiques géotechniques à partir de données pertinentes (investigations à réaliser si besoin), et établit une première identification des risques géotechniques majeurs du site (risques pouvant mettre en cause la faisabilité d'un projet non encore figé) ;
- La phase Principes Généraux de Construction PGC, qui contribue à la mise au point de l'étude préliminaire (ou APS) de l'ouvrage. Elle définit les données géotechniques à prendre en compte à ce stade (investigations à réaliser si besoin) et propose certains principes généraux de construction envisageables. Elle permet d'une part de compléter le modèle géologique et le contexte géotechnique, d'autre part de mieux identifier et hiérarchiser, en fonction de l'ouvrage projeté, les risques géotechniques majeurs afin d'en réduire les conséquences en cas de survenance ;

L'étude géotechnique de conception G2, qui comprend trois phases :

- La phase avant-projet AVP, qui contribue à la mise au point de l'AVP (ou avant-projet Détaillé APD) de l'ouvrage. Elle permet d'une part de compléter le modèle géologique et le contexte géotechnique (investigations en fonction du site et de la complexité de l'ouvrage projeté), d'autre part de mieux identifier les risques géotechniques importants et d'en réduire les conséquences en cas de survenance (risques pouvant nécessiter des mesures appropriées en phase conception et/ou un suivi spécifique en phase réalisation par mise en œuvre de mesures prédéfinies si besoin). Elle définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade AVP et les principes de construction des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et des voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants). Elle fournit une ébauche dimensionnelle par type d'ouvrage géotechnique, une première approche des quantités et conclut sur la pertinence d'application de la méthode observationnelle pour une meilleure gestion des risques résiduels.
- La phase projet PRO, qui contribue à la mise au point du projet de l'ouvrage. Elle définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet, en particulier les valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques (investigations en fonction de la complexité de l'ouvrage). Elle établit les notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et des voiries, améliorations de sols, dispositions vis-à-vis des nappes et des avoisinants), certaines notes de calcul de dimensionnement niveau projet, une approche des quantités et les valeurs seuils si l'application de la méthode observationnelle est conseillée. Si nécessaire, elle donne les principes de maintenance des ouvrages géotechniques.
- La phase DCE/ACT, qui contribue d'une part à l'établissement du Dossier de Consultation des Entreprises de l'ouvrage, d'autre part à l'Assistance pour l'établissement des Contrats de Travaux avec le ou les entrepreneurs retenus pour réaliser les ouvrages géotechniques. Elle participe à la rédaction des documents techniques nécessaires aux entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (dossier de la phase PRO avec plans, notices techniques, cahier des charges techniques particulières, cadre de bordereau des prix et d'estimatif, planning prévisionnel). Elle assiste le maître d'ouvrage ou la maîtrise d'œuvre pour la sélection des entreprises, analyse les offres techniques (projet de base et variantes éventuelles) et

participe à la finalisation des pièces techniques définitives des contrats de travaux concernés par les ouvrages géotechniques.

La supervision géotechnique d'exécution G4, réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière, qui comprend deux phases lors de la réalisation de l'ouvrage :

- La phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution, qui émet un avis pour le visa donné par la maîtrise d'œuvre. Elle donne un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et des méthodes d'exécution, des adaptations ou des optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du programme d'auscultation et des valeurs seuils en cas d'application de la méthode observationnelle.
- La phase Supervision du suivi géotechnique d'exécution. Par interventions ponctuelles sur le chantier, elle donne un avis sur la pertinence du contexte géotechnique et du comportement tels qu'observés par l'entrepreneur de l'ouvrage et des avoisinants concernés ainsi que de l'adaptation ou de l'optimisation éventuelle de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur. Elle permet de donner un avis sur le dossier des ouvrages exécutés (DOE) et sur le dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO) établis par l'entrepreneur.

Côté entrepreneur en charge de la réalisation d'un ouvrage géotechnique, la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution G3 est à réaliser par une ingénierie géotechnique (éventuellement intégrée à l'entreprise) : elle comprend deux phases interactives et indissociables :

- La phase Etude, qui contribue à l'étude d'exécution de l'ouvrage pour la part des ouvrages géotechniques. Elle établit la note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par la G2 phase Projet et des résultats d'investigations complémentaires si besoin. Elle donne le dimensionnement des ouvrages géotechniques, leur méthode et conditions d'exécution, leurs phasages généraux. Elle définit les suivis, les auscultations et les contrôles à prévoir, les valeurs seuils en cas d'application de la méthode observationnelle. Elle définit les moyens à mettre en œuvre pour sécuriser l'ouvrage et les avoisinants concernés ainsi que les adaptations du projet vis-à-vis des risques géotechniques identifiés en cas de survenance en cours de réalisation. Elle participe à l'établissement du dossier géotechnique d'exécution des ouvrages géotechniques provisoires et définitifs avec plans d'exécution, de phasage et de suivi.
- La phase Suivi, qui contribue fortement à la maîtrise des risques géotechniques résiduels pendant la réalisation des ouvrages géotechniques. Par un suivi en continu des travaux géotechniques (relevés) et des auscultations, elle permet d'une part de valider ou de mettre à jour le modèle géologique et les hypothèses géotechniques du site, d'autre part de s'assurer que le comportement en cours d'exécution de l'ouvrage et des avoisinants est conforme aux prévisions ou de mettre en œuvre à temps les adaptations nécessaires (mesures correctives prédéfinies) ou les optimisations possibles en cas d'application de la méthode observationnelle. Dans le cas de survenance d'un risque non identifié, elle permet de prendre les mesures sécuritaires qui s'imposent et d'alerter la maîtrise d'œuvre pour lancer en urgence un diagnostic géotechnique avec si besoin des investigations géotechniques pertinentes, et adapter en conséquence l'étude géotechnique d'exécution. Elle participe à l'établissement par l'entrepreneur du DOE et du DIUO.

6 MANAGEMENT DES RISQUES GEOTECHNIQUES

Dans le cadre de l'enchaînement des missions types d'ingénierie géotechnique, des risques géotechniques sont identifiés en fonction des données collectées et des spécificités de l'ouvrage géotechnique projeté, puis font l'objet d'une évaluation pour hiérarchisation et d'un traitement. Les risques géotechniques sont liés à une connaissance partielle des caractéristiques géotechniques du site susceptibles d'avoir des conséquences sur le comportement des ouvrages. Ils dépendent donc des incertitudes résiduelles (degré de connaissance limité malgré des investigations réalisées par étapes successives pendant les différentes phases de conception et un suivi géotechnique en phase de travaux), de la variabilité naturelle des paramètres et des accidents géologiques.

Les risques géotechniques identifiés sont classés selon une échelle de gravité pour apprécier leur impact sur le projet : les risques majeurs peuvent remettre en cause le projet, les risques importants peuvent nécessiter des mesures appropriées en phase conception et/ou un suivi spécifique en phase réalisation pour décider si nécessaire de la mise en œuvre d'adaptations ou de mesures prédéfinies, les risques mineurs peuvent justifier une optimisation en phase conception ou un suivi spécifique en phase réalisation pour aboutir à un faible impact en termes de qualité, sécurité, coût et délai.

Face à chaque risque identifié, il convient de définir les actions préventives possibles pour le réduire (réduction des incertitudes ou de l'impact potentiel de ces incertitudes), les dispositions à mettre en œuvre pour détecter sa survenance le plus tôt possible (programme de suivi et de contrôle avec valeurs seuils associées) et les actions correctives pour en minimiser l'impact s'il se réalise (adaptation du projet).

Le traitement des risques est adapté à chaque phase de déroulement du projet. Le canevas de traitement habituel est le suivant :

- le risque majeur identifié est réduit ou annulé par des recommandations appropriées pour le futur ouvrage dès la G1 ;
- le risque important identifié est réduit ou annulé par des mesures appropriées au stade de la G2 : adaptation du projet, suivi spécifique avec des mesures prédéfinies et des valeurs seuils associées, adaptations possibles en phase de réalisation ;
- le risque mineur identifié a un faible impact et peut justifier une solution d'optimisation au stade de la réalisation.

La gestion des risques (et donc de leur coût potentiel) est axée sur leur détection le plus tôt possible et sur le contrôle de l'efficacité des solutions correctives prédéfinies. Elle s'appuie sur les actions suivantes :

Au stade de la conception de l'ouvrage :

- évaluation des incertitudes et de la variabilité des paramètres influents, avec réalisation d'investigations géotechniques pour les réduire ;
- reconnaissance des avoisinants concernés (ZIG) ;
- définition des éventuelles dispositions constructives complémentaires à mettre en œuvre si le contexte géotechnique ou le comportement de l'ouvrage observé n'est pas conforme aux prévisions ;
- définition des adaptations possibles avec recherche d'opportunités ;
- prise en compte des risques inhérents par leur budgétisation et leur incidence sur les délais ;
- prise en compte de la maintenance inhérente à certains types d'ouvrages géotechniques (drains, tirants...).

Pendant la réalisation de l'ouvrage : suivi et contrôle géotechnique en continu (valeurs seuils associées).

Pendant l'exploitation de l'ouvrage : mise en œuvre de la maintenance inhérente à certains types d'ouvrages géotechniques.

7 CONCLUSION

L'application de la norme NF P 94-500 sur les missions types d'ingénierie géotechnique à réaliser dans le cadre de la conception puis de la réalisation d'un ouvrage est la clé de voûte du management des risques géotechniques. Le retour d'expérience montre que tout investissement fait par le maître d'ouvrage en phase conception pour la maîtrise des risques liés au site et aux sols est hautement rentable, l'approche quantitative faite pour les ouvrages souterrains en est une illustration (voir Figure 3). Comme disait Francis BACON, philosophe de la fin du 16^{ème} siècle : « On ne commande à la nature qu'en lui obéissant ».

Les assureurs, qui mettent en place les polices d'assurance des intervenants pour couvrir les risques résiduels, sont les garants de l'application effective de cette norme qui consacre le rôle majeur joué par l'ingénierie géotechnique dans le management des risques. L'application de cette norme est une condition nécessaire pour répondre aux attentes du maître d'ouvrage qui recherche un ouvrage de qualité sans dépassement de délai et de coût.

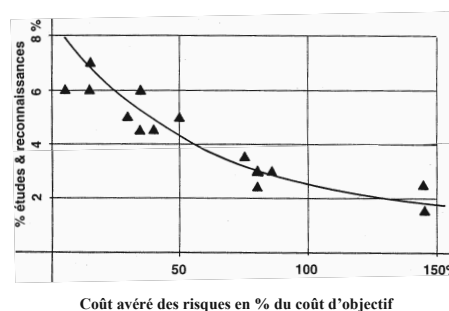


Figure 3 : Corrélation entre coût des études + investigations et coût avéré des risques pour plusieurs tunnels

8 REFERENCES

- AFNOR Norme NF P 94-500 décembre 2006, Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications, révision en 2013.
- AFTES Recommandation sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, TES n°232, 2012.
- GERMA Management des projets complexes de génie civil et urbain, janvier 2012.
- Motaz J. et al., Prévention des risques importants des grands ouvrages de bâtiment – guide pratique, AQC Editions 2010
- Breyse D., Maîtrise des risques en génie civil, Hermès, 2009
- Blondeau F. et al., Effets de l'encadrement juridique sur la pratique de la géotechnique, Revue Française de géotechnique n°123, 2008.
- Robert J., Le management des risques techniques pour la construction d'un tunnel en site urbain : la théorie et la pratique, AFTES Congrès de Monaco, 2008
- AFTES Recommandations Comment maîtriser les coûts de son projet, TOS n°201, 2007.
- Allagnat D. et al., La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages, Presses des Ponts et Chaussées, 2005.
- AFNOR Norme FD X50-117 Management des risques d'un projet, 2003.