

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.

L'accompagnement géotechnique indispensable pour la réussite d'un projet

Essential geotechnical studies for the success of a project

J. Robert
Arcadis, Paris, France

RESUME

Les risques géologiques à maîtriser lors de la réalisation d'un projet se sont accrus suite à une complexité grandissante des ouvrages à construire sur des terrains disponibles de moins bonne qualité géotechnique et avec un environnement plus sensible dû à une forte occupation du sol et du sous-sol par des ouvrages vulnérables. Seul l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique au cours des étapes d'élaboration et de réalisation du projet permet une réduction progressive des incertitudes et des aléas géologiques, donc des risques associés. Ainsi les études géotechniques successives d'avant projet et de projet finalisent une conception « interactive » des ouvrages géotechniques, validée ou adaptée en cours de travaux selon les conditions géotechniques réellement observées et prises en compte en temps réel grâce à une mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution encadrée par une mission de supervision géotechnique d'exécution. Seul cet accompagnement permet de répondre aux attentes du maître d'ouvrage à la recherche d'un ouvrage de qualité sans dépassement de délai et de coût.

ABSTRACT

The geological risks to control for the realization of a project increased following a growing complexity of the project to build on a site of worse geotechnical quality and with a more sensitive environment with vulnerable buildings. Only the sequence of the geotechnical engineering missions during the stages of the project design and realization allows a progressive reduction of uncertainties and geological risks. Thus the geotechnical studies of preliminary and detail design finalize an "interactive" design of the geotechnical works, validated or adapted during works in progress according to the geotechnical conditions observed and taken into account in real time thanks to a mission of execution geotechnical study and follow-up framed by a geotechnical supervision of execution. Only these essential geotechnical studies make it is possible to reach the waitings of the building owner who seeks a work of quality without increase of duration and cost.

Keywords : geotechnical engineering, risk management, interactive design, standards

1 LES BESOINS DU MAITRE D'OUVRAGE

La Société actuelle n'est pas à un paradoxe près : elle prône le risque « zéro », le principe de précaution, mais le sentiment d'insécurité ne cesse de croître alors que les protections n'ont jamais été aussi fortes. Cette évolution vers une exigence croissante de sécurité où la « fatalité » n'est plus acceptée s'oppose à la liberté individuelle empreinte de tolérance voire d'appétit pour la prise de risques. La perception même des risques est évolutive : ils sont plus diffus, plus complexes, parfois à plus grande échelle, le progrès technique apparaissant lui-même comme un facteur de risques. Le corollaire à cette évolution est une demande de couverture des risques de plus en plus étendue. Pour éviter l'écueil de la déresponsabilisation, il est indispensable d'inciter chacun à diminuer son exposition aux risques par une information transparente et une responsabilité équitablement partagée. Il ne sera jamais possible de tout prévoir ou assurer : l'assurance doit rester le moyen d'amortir l'effet dévastateur d'un sinistre par une mutualisation dans le temps et dans l'espace.

Le domaine de la construction n'échappe pas à cette évolution plus générale d'aversion du risque et de recherche de sa couverture par l'assurance. Ainsi, le maître d'ouvrage, qui décide de réaliser un ouvrage, exige la bonne maîtrise de la sécurité des personnes aussi bien en phase de travaux qu'en phase d'exploitation, une grande qualité pour son ouvrage, le respect du délai et du coût d'exécution programmés. Et pourtant, les risques associés à tout projet n'ont jamais été aussi grands. Il est donc primordial pour l'ingénierie, au cœur de l'acte de construire par sa présence de l'initialisation du projet à la fin des travaux, de savoir gérer les risques tout au long du

déroulement du projet en partenariat avec le maître d'ouvrage et l'entrepreneur.

La tâche de l'ingénierie n'est pas facile, compte tenu de l'accroissement des risques constaté dans le domaine de la construction et dont les causes sont multiples :

- le maître d'ouvrage ne s'entoure pas toujours des compétences justifiées par la complexité de son projet, souvent par recherche d'économies, parfois par manque de temps ;
- le délai global exigé par le maître d'ouvrage pour la conception et la réalisation du projet est souvent trop court, ce qui conduit à réduire anormalement le délai des études car le délai de réalisation des travaux lui paraît plus difficile à raccourcir ;
- l'ouvrage est de plus en plus complexe et nécessite l'intervention de nombreux spécialistes, avec les risques liés aux interfaces et à la déresponsabilisation. Les exigences de performance et de qualité sont renforcées, les tolérances réduites. Les méthodes d'exécution pointues deviennent de moins en moins adaptables face à un problème non prévu ;
- les terrains disponibles sont souvent de qualité géotechnique médiocre et avec un voisinage sensible. L'ingénierie géotechnique est alors là pour trouver la meilleure solution à tout problème. Le critère de risques liés au voisinage n'est plus déterminant dans le choix du terrain. De plus, les riverains ne tolèrent plus le moindre trouble de jouissance (bruit, vibrations, poussière) : ils n'hésitent pas à entreprendre des actions en justice pour arrêter un chantier ;
- la maintenance est souvent négligée par souci d'économie : son absence fait courir un risque grave à l'ouvrage lorsque les études de conception et d'exécution ont établi sa nécessité.

Devant cet accroissement des risques, il est apparu nécessaire à tous les acteurs de la construction que le management d'un

projet intègre un processus de gestion continue des risques. Seule cette démarche permet d'obtenir un ouvrage de qualité, tout en optimisant son coût et son délai de réalisation. Les risques géologiques occupent une place importante dans les risques identifiés, il est nécessaire d'en assurer la maîtrise pour la réussite d'un projet, comme le souligne l'avant-propos de la norme AFNOR NFP 94-500 sur la classification et les spécifications des missions d'ingénierie géotechnique.

2 LES FONDAMENTAUX DU MANAGEMENT DES RISQUES

Par « risque d'un projet », il faut entendre tout événement dont l'apparition n'est pas certaine et dont la manifestation est susceptible d'affecter les objectifs du projet. Le risque ne doit pas être confondu avec l'imprévu, l'aléa ou le problème :

- l'imprévu est un événement non-identifiable ;
- l'aléa est un événement identifiable avec une probabilité d'occurrence non quantifiable ;
- le risque est un événement identifiable avec une probabilité d'occurrence quantifiable ;
- le problème est un événement qui s'est déjà produit.

Le management des risques est un processus itératif et continu au cours du déroulement du projet. Il se décompose en cinq tâches : identification, estimation, traitement, suivi et contrôle, mémorisation et capitalisation des expériences.

L'estimation d'un risque identifié consiste à évaluer sa criticité globale C_g , égale au produit de sa probabilité d'apparition P par sa gravité G . Compte tenu de la spécificité des risques géologiques, il est recommandé pour en faire une estimation réaliste d'affecter une valeur de 1 à 4 à P et à G (figure 1), en déclinant si nécessaire la gravité en gravité de

Valeur	1	2	3	4
Probabilité P				
Qualification	improbable	très peu probable	probable	fortement probable
Fréquence estimée sur durée projet	< 1 chance sur 10	< 1 chance sur 2	> 1 chance sur 2	> 9 chances sur 10
Gravité G	négligeable	significatif	majeure	catastrophique
Gravité de qualité Gq : impact sur exploitation	Aucun impact sur exploitation	maintenance plus importante	adaptation exploitation	inacceptable
Gravité de coût Gc : dépassement	< 10%	10 à 20 %	20 à 50 %	> 50 %
Gravité de délai Gd : impact retard	non significatif sur planning	rattrapable au niveau génie civil	rattrapable au niveau équipements	impact sur exploitation

Figure 1 .Quantification de la probabilité P et de la gravité G

qualité G_q , de coût G_c et de délai G_d , la gravité globale G étant alors la moyenne des gravités avec coefficients de pondération dépendant de la hiérarchisation des objectifs du projet. C_g est alors compris entre 1 et 16, ce qui permet de hiérarchiser les risques identifiés et de définir ceux qui doivent faire l'objet d'un traitement. Usuellement, le risque ainsi quantifié est « acceptable » pour C_g au plus égal à 3, « à surveiller » pour C_g compris entre 3 et 6, « majeur » (inacceptable) pour C_g supérieur à 6.

Certains fondamentaux sont à respecter pour assurer une bonne maîtrise des risques, dont les risques géologiques :

- la maturité du projet doit être suffisante à chaque étape, en particulier pour les données d'entrée (dont les investigations),
- les compétences nécessaires à chaque étape doivent être mobilisées,
- le management des risques doit être mis en place dès le démarrage du projet : il sera ainsi dynamique, efficace et traçable (traçabilité des décisions et des évolutions du projet),

- la contractualisation doit inciter les acteurs à avoir une vision partenariale des problèmes à résoudre : répartition équilibrée des engagements en fonction des compétences, contrats sur prix mixtes forfaitaires et unitaires (la survenance de risques pouvant modifier la prestation à réaliser), contrats en partenariat gagnant-gagnant avec une provision pour risques co-gérée pendant les travaux, l'éventuel solde étant partagé entre les acteurs en fonction de leur implication.

3 LES RISQUES GEOLOGIQUES

Les risques géologiques occupent une place importante dans l'analyse des risques d'un projet. En effet, il y a toujours une forte interaction entre ses ouvrages géotechniques (terrassements, remblais, soutènements, drainages/pompages, fondations, infrastructures enterrées, dallages, voiries), le contexte géologique du site et le comportement des ouvrages avoisinants. Pour bien maîtriser ces risques géologiques liés à ces interactions sol – structure, il faut :

- une bonne connaissance de l'état initial du contexte géotechnique du site ;
- une bonne évaluation de l'impact de l'ouvrage sur l'état initial et de son comportement dans ce contexte ;
- une bonne appréciation de l'impact de l'ouvrage sur les avoisinants, en phase construction et en phase exploitation.

Or la connaissance de l'état initial du contexte géotechnique d'un site est toujours partielle à plusieurs titres :

- par suite de la variabilité naturelle des terrains : elle concerne aussi bien la géométrie des formations que leur nature et leur comportement, leurs discontinuités ou leur état de contraintes in situ. Cette variabilité peut être accentuée par des circulations d'eau variables dans le temps. Ce caractère aléatoire est important car tout site est constitué par des formations géologiques de lithologie très variable dans l'espace et avec une tectonique à l'origine de discontinuités et de lois de comportement très variées (déformabilité, équilibres limites). De plus l'homme a involontairement accentué cette hétérogénéité par l'exploitation de matériaux tant à ciel ouvert qu'en galeries souterraines. La réduction des incertitudes sur la connaissance factuelle du sous-sol nécessite la réalisation des études géotechniques et des investigations correspondantes par étapes successives.

La connaissance partielle du sous-sol, acquise à un instant donné, peut être mise en défaut par une évolution de ses propriétés dans le temps due à :

- la variation du niveau des nappes en rapport avec la pluviométrie, les pompages répertoriés ;
 - la dissolution des matériaux avec création de cavités et réseaux karstiques, surtout dans le gypse et les calcaires ;
 - l'exploitation de matériaux à ciel ouvert ou en souterrain ;
 - l'évolution de la stabilité des falaises et des versants par suite de circulations d'eau ou d'érosion ;
 - le gonflement et le retrait des argiles, le gonflement de l'anhydrite en présence d'eau jusqu'à 60% en volume ;
 - l'existence de pollution de nappes ou formations par suite des utilisations historiques du site ou de son voisinage ;
 - la liquéfaction de matériaux sous séisme.
- par suite de la connaissance toujours partielle des terrains due à la fois à la quantité limitée des investigations, à leur qualité et à l'interprétation qu'on en fait. La part du connu, fruit des investigations ponctuelles, est toujours limitée : entre les sondages réalisés, il est fait des interpolations et suppositions laissant la place à l'aléa géologique, réel ou non, prévisible ou non. La connaissance objective du sous-sol ne peut qu'être progressive au fil de la réalisation du projet, par des investigations réalisées par étapes et des observations en cours de travaux (terrassements, fouilles, fondations).

- par suite de la modélisation toujours simplificatrice prise en compte pour définir le contexte géotechnique du site et étudier l'interaction sol – structure.

En plus de cette connaissance toujours partielle du contexte géotechnique du site où doit être construit le projet, la nature même de l'ouvrage à construire peut aussi avoir une influence importante sur ce contexte et l'interaction sol – structure, d'où une modification des risques géologiques identifiés dans le cadre du contexte géotechnique initial du site. A titre d'illustration, l'emprise au sol de l'ouvrage, la profondeur de son niveau bas et l'importance des charges qu'il apporte influent sur le volume du massif mobilisé par l'interaction sol – structure, donc sur la nature des risques géologiques. Il en est de même avec le degré de sensibilité de sa structure vis-à-vis des incertitudes et des variabilités du contexte géotechnique, par exemple pour les problèmes de poussée des terrains et de tassements. L'exécution d'une paroi moulée peut créer un barrage à l'écoulement naturel d'une nappe et provoquer une surélévation de son niveau statique qu'il faut prendre en compte dans la conception de l'ouvrage. La création d'une fouille en déblai peut être à l'origine d'une chute des caractéristiques intrinsèques des matériaux en talus (passage aux caractéristiques résiduelles). La mise en place de palplanches par vibrofonçage peut provoquer des tassements du voisinage par compaction de certaines couches.

La bonne appréciation de la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) permet une meilleure identification des risques géologiques associés au projet. Mais cette ZIG, volume du massif au sein duquel il y a interaction entre d'une part le sol et les ouvrages environnants, d'autre part l'ouvrage du fait de sa réalisation et de son exploitation, a une forme et une extension spécifiques non seulement à chaque site (contexte géologique et nature des avoisinants) mais également à chaque ouvrage à construire (géométrie, phasage et méthode de construction, conditions d'exploitation). Ainsi, chaque ouvrage existant, implanté dans la ZIG, doit être bien identifié et sa vulnérabilité analysée : elle dépend à la fois des caractéristiques géotechniques des formations qu'il mobilise et de sa nature (type de structure et de fondations). Cette analyse peut conduire à préconiser des dispositions préventives concernant l'ouvrage existant (reprises en sous œuvre, amélioration des sols) ou l'ouvrage à construire (adaptation locale de la méthode de construction), et éventuellement des dispositions curatives si le comportement observé du massif ou de l'ouvrage existant conduit à l'apparition de désordres sur ce dernier. La présence d'ouvrages existants enterrés, connus ou non, peut modifier tant l'état initial que le comportement du sous-sol : présence d'anciennes fondations, de remblais, de vestiges, de réseaux en exploitation ou abandonnés.

4 LE BON MANAGEMENT DES RISQUES GEOLOGIQUES

Un bon management des risques géologiques suppose d'abord leur identification de façon la plus exhaustive possible lors des études et l'étude de leur impact sur le projet suffisamment dans le détail pour pouvoir définir aussi bien les actions préventives (au stade de la conception) que les parades à mettre en œuvre en cas de rencontre du problème (au stade des travaux).

Comme le souligne la norme AFNOR NFP 94-500, « une gestion optimale des risques géologiques nécessite l'intervention de l'ingénierie géotechnique à tous les stades de conception, réalisation et maintenance ». Elle est la mieux qualifiée pour assister le maître d'ouvrage à faire les bons choix face aux aléas géologiques tributaires du contexte géologique réel du site (connaissance partielle, modélisation simplificatrice et réductrice), des spécificités de l'ouvrage à construire et de la ZIG (sensibilité aux incertitudes et variabilités géotechniques). Seul l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique permet d'optimiser l'adaptation du projet au contexte géotech-

nique appréhendé progressivement. Les aléas majeurs sont ainsi traités à l'avant projet géotechnique, les aléas significatifs au projet géotechnique par des adaptations ou des mesures pré-définies et pendant les travaux par un suivi géotechnique pour déclencher à temps l'application de ces mesures en cas de survenance du problème, les aléas résiduels lors de l'exécution.

En phase conception, l'ingénierie géotechnique, missionnée pour une étude géotechnique d'avant projet puis de projet, évalue avec de plus en plus de précision et d'exhaustivité les incertitudes et la variabilité des paramètres géotechniques, qualifie la sensibilité des ouvrages géotechniques à construire et du voisinage, définit les dispositions constructives complémentaires à mettre en œuvre en cas d'aléa géologique ainsi que les adaptations et les recherches d'opportunités possibles, identifie les risques inhérents à budgéter, conçoit un dispositif de suivi et de contrôle du voisinage et de l'ouvrage pour valider au plus tôt la concordance entre prévision et réalité, et enfin définit la maintenance de certains ouvrages géotechniques, tels les systèmes de drainage.

En phase travaux, l'ingénierie géotechnique, chargée par l'entrepreneur de l'étude et suivi géotechniques d'exécution, dimensionne les ouvrages géotechniques à réaliser en tenant compte des méthodes d'exécution retenues, définit et assure l'exploitation du dispositif de suivi et contrôle avec comparaison à des seuils de vigilance et d'alerte afin de détecter au plus tôt toute anomalie par rapport aux prévisions, conseille si nécessaire la mise en œuvre des dispositions constructives définies à l'avance, décrit la maintenance et le suivi adaptés au contexte géotechnique et à l'ouvrage compte tenu des observations faites en cours de travaux. L'ingénierie géotechnique, chargée par le maître d'ouvrage de la supervision géotechnique d'exécution, donne son avis sur l'étude géotechnique d'exécution, sur les adaptations ou optimisations potentielles proposées par l'entrepreneur ainsi que sur le programme d'auscultation et les valeurs seuils associées ; par des interventions ponctuelles sur le chantier, elle peut ainsi valider le contexte géotechnique pris en compte dans les études d'exécution ainsi que le comportement des ouvrages géotechniques et des avoisinants observé par l'entrepreneur et donner son avis sur les adaptations et/ou optimisations proposées par l'entrepreneur.

Face à ces risques géologiques très importants liés au caractère expérimental de cette science pour laquelle le retour d'expérience est particulièrement bénéfique, l'application de la conception interactive (logigramme de la conception interactive en figure 2) est fortement recommandée car elle permet une adaptation de la conception des ouvrages géotechniques au comportement observé du massif, des avoisinants et de l'ouvrage lui-même en cours de construction. Ce n'est pas qu'une méthode observationnelle car, avant la simple observation ou constat lors des travaux, elle nécessite un investissement important en études en amont (étude de plusieurs comportements prévisionnels et analyses en retour en fonction des comportements observés pour mieux prévoir les conditions de poursuite des travaux), d'où une réalisation de l'ouvrage dans des conditions optimales de sécurité, de délai et de coût. Il est important de rappeler les quatre exigences à remplir avant le début des travaux :

- définir les limites admissibles du comportement de l'ouvrage à construire et des ouvrages voisins ;
- estimer le domaine de variations possibles du comportement avec recherche d'une probabilité acceptable pour un comportement réel dans les limites admissibles ;
- définir un programme de suivi pour vérifier que le comportement réel est dans les limites admises ;
- définir un programme de mesures d'urgence à appliquer si le suivi révèle un comportement sortant des limites admissibles.

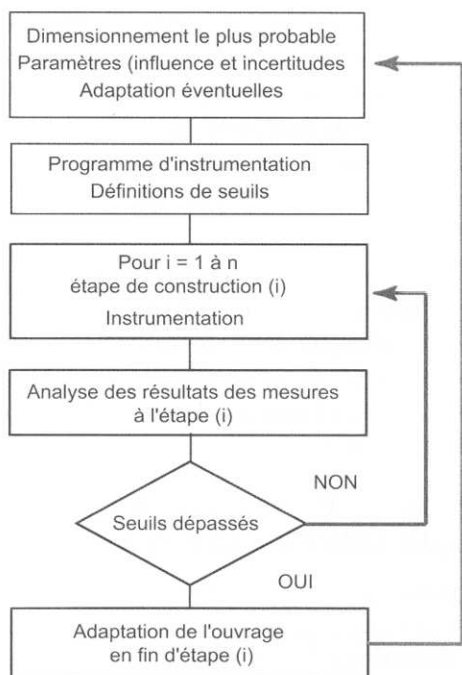


Figure 2. Logigramme de la conception interactive

Ainsi, les incertitudes inhérentes à la réalisation des ouvrages géotechniques en interaction avec le massif doivent conduire à appliquer les principes de cette conception interactive. Des moyens d'auscultation suffisants sont mis en œuvre avant tous travaux, en surface, sur le bâti et au sein du massif : une exploitation en temps réel permet alors d'adapter les ouvrages géotechniques selon des modifications prévues à l'avance. Cette approche est facilitée par l'automatisation des moyens d'auscultation couplée à des bases de données informatisées, permettant à tous les acteurs de disposer sans délai des observations et de leur traitement. Les avancées en modèles de calcul permettent la mise en œuvre de procédures d'analyse inverse pour une rétro-analyse plus rigoureuse des hypothèses de conception et de calcul.

5 LES AXES D'AMÉLIORATION POUR LA REUSSITE D'UN PROJET

Les axes d'amélioration à privilégier doivent s'appuyer sur les trois constats suivants :

- les besoins du maître d'ouvrage sont bien identifiés : une bonne maîtrise de la sécurité des personnes en phase réalisation et en phase exploitation, de la qualité de l'ouvrage, de son délai et de son coût de réalisation ;
- tout projet est à plus d'un titre un prototype, de forte complexité, dans un contexte géotechnique de site souvent défavorable, avec une structure d'ouvrage exigeante vis-à-vis de son comportement acceptable et du voisinage ;

- les ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, fondations en particulier) sont réalisés chronologiquement avant les structures définitives de l'ouvrage projeté.

Face à ces constats, cinq axes d'amélioration sont à privilégier :

- le management des risques géologiques doit être efficace, dynamique et traçable. Il doit régner entre tous les acteurs de la construction un état d'esprit de partage, transparence et réactivité, avec une gestion optimale des interfaces. Le partage des risques doit résulter d'une démarche volontaire et non fataliste, chaque risque étant pris en charge par l'intervenant le mieux à même de le maîtriser compte tenu de sa compétence technique et de ses engagements contractuels ;
- l'ingénierie géotechnique doit veiller à ce que la maturité des études géotechniques soit suffisante à chaque étape de la conception puis de l'exécution pour que la gestion des risques géologiques soit pertinente pendant le déroulement du projet : c'est son devoir de conseil envers le maître d'ouvrage. Les missions successives d'ingénierie géotechnique doivent se dérouler à temps, donc en avance par rapport aux autres études, les ouvrages géotechniques étant réalisés en premier ;
- la géotechnique étant une science expérimentale et non occulte, la conception interactive s'impose : elle nécessite un investissement plus important en études (étude de plusieurs comportements prévisionnels et analyses en retour) ;
- l'ingénierie géotechnique doit conseiller au maître d'ouvrage le type de contrats de travaux le mieux adapté au niveau de définition des ouvrages géotechniques afin de permettre un partage des risques le plus efficace et le mode de rémunération des entrepreneurs le plus adéquat ;
- l'ingénierie géotechnique doit, pour apporter le meilleur service, avoir une bonne connaissance théorique de sa science, avoir un solide retour d'expérience et être un bon pédagogue pour convaincre et maintenir un dialogue constructif entre tous les intervenants à l'acte de construire.

L'accompagnement géotechnique est indispensable pour la réussite d'un projet car il permet, vis-à-vis des risques géologiques, une répartition équilibrée des engagements de chaque acteur dans son domaine de compétence et dans sa sphère d'influence, avec une vision partenariale des problèmes géotechniques à résoudre.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, 2006. Norme NF P94-500 : missions d'ingénierie géotechnique. Classification et spécifications.
- AFTES, 2007. Recommandations « Comment maîtriser les coûts de son projet ? ». Tunnels et Ouvrages Souterrains (TOS) n°201, 128-168.
- Allagnat D. et al., 2005. La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages, Presses des Ponts et Chaussées.
- CFMS, 2007. Effets de l'encadrement juridique sur la pratique géotechnique.
- PFE-USG, 2008. Colloque « Management des risques géologiques en construction : l'apport de l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique ».
- Robert J., 2008. Le management des risques techniques pour la construction d'un tunnel en site urbain : la théorie et la pratique, AFTES Congrès de Monaco.