



GUIDE GÉOTECHNIQUE DES OUVRAGES D'ART

S. SEKKATTE (DRCR)
B. RHAZLAOUI (DRCR)

PRÉAMBULE

La connaissance de la nature du sol est souvent décisive pour le choix entre plusieurs types d'ouvrages, et il est indispensable de commencer les études géotechniques dès le début du projet.

Dans ce domaine, le risque le plus grave de conséquences est celui de l'insuffisance des études géotechniques. Cela peut entraîner à l'exécution des modifications et des renforcements très onéreux lorsqu'on découvre plus tard que le sol est différent de ce qu'on attendait.

Mais inversement, il faut éviter un excès d'études géotechniques qui sont souvent coûteuses et qui peuvent fournir, si on ne les limite pas, une masse de renseignements inutiles. Il appartient donc au maître d'œuvre de définir la juste mesure, dans chaque phase d'étude au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Aussi, est-il apparu nécessaire de rappeler un certain nombre des règles à suivre pour garantir l'obtention des résultats suffisants. A cet effet, ce guide présente le cadre le plus adéquat pour les différentes étapes d'une reconnaissance de fondation d'ouvrage d'art courant, en indiquant les éléments connus au début de chaque phase d'étude et ceux que l'on désire déterminer.

En second lieu, ce guide présente une description de reconnaissance et des mesures des caractéristiques géotechniques tant sur le site qu'au laboratoire.

PHASES DE RECONNAISSANCE

Les études des ouvrages d'art incorporés aux tracés routiers suivent en général les phases suivantes :

- *Etude de définition, d'avant projet et du projet d'exécution.*

A chacune de ces phases correspond un niveau d'étude géotechnique à savoir :

- Au niveau E.D : Enquête préalable.
- Aux niveaux A.P et P.E : Reconnaissance Normale (ou spécifique).

1 - ENQUETE PREALABLE

L'objectif des investigations géologiques, lors de cette phase, est la détermination des données susceptibles d'influer sur le choix d'un type d'ouvrage et l'évaluation sommaire de son coût. Ces investigations doivent répondre aux questions suivantes :

- La nature probable et un prédimensionnement sommaire et indicatif.
- La nature et la consistance probable de la reconnaissance normale (AP et PE).

Les résultats obtenus, au terme de cette phase, sont soit d'ordre indicatif en ce qui concerne le comportement des couches soit d'ordre descriptif pour le volet géologique.

Ces résultats permettent de confirmer – ou de modifier – et de préciser les premières hypothèses et de reprendre en conséquence les études du projet. Ils doivent indiquer, également, au maître d'œuvre des renseignements qualitatifs et quantitatifs suffisants pour que celui ci puisse faire une estimation sommaire des fondations.

Par ailleurs, le tableau I, récapitule les objectifs à atteindre, les moyens et sources d'informations ainsi que les résultats et conclusions que le chef de projet (BET) est appelé à tirer de cette étude.

2 - RECONNAISSANCE NORMALE

Sur la base du rapport géotechnique et suivant la (ou les) variante(s) d'ouvrages retenues par l'étude de définition, l'administration fait exécuter le programme des sondages et essais de laboratoire jugé nécessaire à l'étude des fondations de l'ouvrage avec la précision requise pour l'évaluation de leur coût.

Ces sondages et essais tendront à déterminer la nature, l'épaisseur et les caractéristiques géotechniques utiles des diverses couches de sol jusqu'à rencontrer une couche suffisamment résistante pour servir d'assise aux fondations, cette dernière est explorée à une profondeur suffisante pour se prémunir des risques de discontinuité, cavités et surprises géologiques diverses, s'il y a des raisons de craindre des surprises pouvant renchérir notablement l'ouvrage, il sera procédé avec l'accord de l'administration à des sondages et essais complémentaires.

3 - RECONNAISSANCE SPECIFIQUE

L'étude géotechnique spécifique n'est envisagée que lorsque l'étude normale a mis en évidence un problème géotechnique pour lequel il convient d'approfondir les connaissances ou en cas de non-disponibilité à la fin de

l'étude géotechnique normale d'un paramètre dont la connaissance permettrait d'optimiser le calcul des fondations de l'ouvrage.

Il est impossible d'établir une liste type de la reconnaissance de la consistance et des phases d'une reconnaissance spécifique vu la variété des cas à traiter. On donne cependant ci-après une liste ouverte des problèmes pouvant y conduire :

Fondations spéciales

- Tassements importants de consolidation ;
- Sols compressibles et poussées latérales ;
- Force portante douteuse, frottements négatifs, pieux flottants ;
- Terrains très hétérogènes ;
- Problèmes liés à la présence d'eau .

Fondations exceptionnelles

- Reprise en sous œuvre ;
- Caissons havés ou foncés à l'air comprimé ;
- Tirants d'ancrages.

Sites difficiles

- Instabilité générale, frottements ou poussées de grande ampleur, glissements de terrain ;
- Poussées mal connues (pentes d'éboulis).

ORGANISATION DE LA RECONNAISSANCE

1 - CONDUITE DES ESSAIS

L'enquête préalable effectuée lors de l'étude de définition de l'ouvrage a apporté les premiers éléments, alors exploités pour déterminer les variantes proposées. Ainsi les bases de la reconnaissance normale sont définies. Le chef du projet (B.E.T), après concertation avec le laboratoire, le géologue et l'administration arrête alors la commande au niveau de l'AP :

- nombre, nature et profondeur des sondages
- essais in situ
- essais en laboratoire.

Il propose en même temps les dispositions organisationnelles, l'information de ses partenaires sur les renseignements recherchés, explique la conception des variantes géotechniques (sensibilité sol- structure des différentes variantes)

Pour aborder l'ensemble de ces questions, les études géotechniques peuvent être menées selon le cheminement-type présenté dans les tableaux I et II ci-joints.

Quant aux essais à effectuer, il n'est pas question de présenter une liste-type ; Celle-ci dépendrait trop du type de fondation, de l'importance de l'ouvrage et des types de sols et de leurs propriétés connus ou présumées. Néanmoins le tableau III indique, pour certains cas habituels, un schéma de principe de déroulement des investigations

2 - NOMBRE ET IMPLANTATION DES ESSAIS

Si l'implantation est définie, les essais seront effectués dans l'axe de l'ouvrage et de préférence centrés sur les appuis ; par exemple trois (3) sondages : au droit des appuis extrêmes (qui en général, posent plus de problèmes : Stabilité, tassement, cause du remblai) et d'un appui intermédiaire. Dans le cas d'un ouvrage large on sera amené à l'encadrer par quatre (4) sondages en place pour obtenir un profil transversal du terrain.

Si l'implantation n'est pas définie (cas très rare pour les ouvrages autoroutiers), on pourra déterminer la meilleure position des appuis à l'aide d'essais rapides (pénétromètre dynamique ou statique, essais géophysique, forages rapides dans les cas simples).

Si des discontinuités géotechniques notables apparaissent au vu des premiers sondages en place, on complétera à raison de un (1) sondage par appui.

Dans certains cas de grande hétérogénéité constatée (faille, karst), on sera amené à effectuer plusieurs sondages sous chaque appui, pour obtenir une coupe géotechnique transversale.

3 - PROFONDEUR DES ESSAIS

Lorsqu'une **fondation profonde** peut être envisagée, les sondages en place ou les forages devront atteindre une profondeur suffisante.

Les conclusions de l'étude préalable permettent de donner le niveau approximatif de fondation et un ordre de grandeur de la contrainte à appliquer au sol.

- Dans le cas d'un substratum sain très résistant et de puissance importante, il peut suffire d'en reconnaître la cote du toit.

- Dans le cas d'une couche porteuse moins bonne mais où les pieux travaillent principalement en pointe, on descendra à cinq (5) fois le diamètre de profondeur.
- Dans le cas où on craint la présence de couches inférieure de qualité moindre, on descend certains forages jusqu'à 1 à 1.5 fois la largeur d'un groupe de pieux sous la base de celui-ci.

Pour les **fondations superficielles**, il faudra reconnaître la couche porteuse sur une hauteur égale à environ trois (3) fois la largeur de la semelle, et donc au moins cinq mètres (5m) pour les fondations des ouvrages d'art courants.

De toute façon, le premier sondage ou forage devra atteindre environ 10 mètres de profondeur au moins sous la ligne rouge du projet, ou pénétrer dans le substratum dur de 3 à 5 mètres, la valeur exacte dépendant de la précision des renseignements géologiques recueillis. La profondeur des sondages suivants sera déterminée en fonction des résultats du premier.

DESCRIPTION DES SONDAGES ET ESSAIS

1 - SONDAGES ET PRELEVEMENTS D'ÉCHANTILLONS

Pour le prélèvement d'échantillons, le forage du trou peut se faire de l'un des procédés suivants :

- **Puits manuels** : Il consiste à réaliser dans le sol (cohérent à peu cohérent) un trou de 1.5x1.5m et permet d'obtenir une coupe du terrain. Il présente l'avantage d'avoir un coût faible et apprécier certains particularités à leur échelle réelle.

- **Tanière à la main** : Il consiste à enfoncer par rotation manuelle dans un sol (peu compact) une tige hélicoïdale permettant de ramener à la surface un spécimen remanié des formations traversées. Il présente l'avantage d'avoir un coût faible et une rapidité d'exaction.

- **Sondage carotté** : Il consiste à traverser les différentes couches de sol à l'aide d'un tube creux permettant de ramener des échantillons intacts à la surface. Son coût est élevé mais présente à l'inverse des deux procédés précédents les avantages d'être adapté à tous les terrains et ramener des échantillons à de grandes profondeurs.

Ces échantillons ainsi prélevés feront l'objet au laboratoire des essais d'identification, de cisaillement (triaxial, boîte de cisaillement) qui renseignent sur la stabilité et des essais de compressibilité (oedomètre) qui permettent de prévoir les tassements.

2 - ESSAIS IN SITU

- *Pénétromètre dynamique* : C'est un essai qui est utilisé pour avoir des appréciations qualitatives sur les sols en présence (repérage du toit du rocher, appréciation de l'épaisseur d'une couche d'alluvions.) ; Il est déconseillé de l'utiliser comme moyen de calcul des fondations.

- *Pénétromètre statique* : Il permet la mesure de la résistance de pointe d'une part et la résistance totale d'autre part. Les résultats fournis par cet essai permettent de tracer l'évolution de la résistance de pointe en fonction de la profondeur et celle du frottement latéral en fonction de la profondeur.

- *SPT* : L'essai de pénétration dynamique le plus connu est le Standard Pénétration Test (STP) qui permet de mesurer les caractéristiques des fondations sableuses qui se prêtent mal au prélèvement.

- *Pressiomètre* : C'est une mesure qui est largement utilisée puisqu'elle donne à la fois des informations sur la configuration du sol et des renseignements suffisamment précis sur son comportement mécanique. Il permet donc le dimensionnement des fondations des sols courants (argiles, argiles sableuses..).

- *Scissomètre* : L'essai scissométrique est fait pour mesurer en place la cohésion non drainée (C_u) des sols mous et des sols à consistance moyenne (argiles, vases, tourbes..)

La reconnaissance de sols de fondations d'un ouvrage d'art est une tâche délicate qui fait intervenir plusieurs partenaires dont les principaux sont :

L'administration, le B.E.T et le laboratoire des essais.

Il est évident qu'une collaboration est indispensable à toutes les étapes, pour minimiser le coût et les délais de la construction de l'ouvrage en entier.

Toutefois, rappelons en guise de conclusion, quelques erreurs parmi les plus fréquentes, observées dans des cas réels :

- Le projet de structure est fait avant les études de sol. Ceci amène :
 - lorsqu'il y a compatibilité, à conserver des fondations surabondantes ;
 - En cas d'incompatibilité, soit à refaire le projet, soit à l'adapter sommairement en abondant toute idée d'optimiser la dépense totale.
- Le délai accordé pour réaliser les études géotechniques est insuffisant. On risque soit une insuffisance de l'étude (par manque de temps) soit un surcoût dû à la mise en œuvre de moyens surabondants pour tenir malgré tout le délai et le programme.
- Les études géotechniques sont incluses dans le dossier d'AP sans en tirer les conclusions. Cette situation malheureusement fréquente peut être évitée en accordant plus d'intérêt à l'interprétation et à l'exploitation des résultats des reconnaissances et essais.

TABLEAU I : ENQUÊTE PRÉALABLE (ED)

OBJECTIFS	DOCUMENTS A FOURNIR PAR LE B.E.T	MOYENS	RÉSULTATS ET EXPLOITATIONS
- La nature probable des fondations. - Estimations sommaires.	- Vue en plan avec cotes de niveau. - Profil en long dans l'axe de l'ouvrage. - Position des appuis. - Types d'ouvrages envisagés. - Ordre de grandeur des réactions d'appui. - Tassement différentiel admissible pour la structure. - Etude hydrologique.	- Cartes géologiques, géotechniques (si possible) et topographiques. - Enquête locale à partir des précédents (ouvrages voisins) ou puits de la région. - Etudes géotechniques routières existantes. - Eventuelles reconnaissances (1).	- Coupe géologique. - Nature probable du type de fondation (niveaux d'appuis). - Indication d'autres implantations de l'ouvrage (si possible). - Proposition des investigations géotechniques ultérieures et soulèvement des problèmes éventuels (2). - Ordre de grandeur de la contrainte admissible. - Prédimensionnement sommaire et indicatif. - Estimation sommaire.

(1) : Dans le cas où l'enquête préalable ne permet pas de répondre aux objectifs visés, il convient de procéder à des reconnaissances simples (voir & III-1).

(2) Problèmes nécessitant une étude spécifique (voir & I-3).

TABLEAU II : RECONNAISSANCE NORMALE (AP ET PE)

OBJECTIFS	DOCUMENTS A FOURNIR PAR LE B.E.T	MOYENS	RESULTATS ET EXPLOITATION
- Détermination du type de fondation. - Traitement des problèmes géotechniques. - Estimation précise des fondations.	- Rapport de synthèse de l'E.D qui comprend : • Description détaillée de site. • Résultats des investigations éventuelles. • Définition de la couche probable de fondation. - Descendentes de charges en service en différenciant le poids propre et surcharges. - Eléments de bornage, en plan et en nivellement. - Mode de fonctionnement et problèmes spécifiques (*).	- Reconnaissance du terrain par sondages carottés, puits (ou/et) essais insitu définissant les paramètres. - Prélèvement d'échantillon et essais de laboratoire. - Interprétations des résultats.	- Vue en plan avec l'implantation des sondages. - Coupe longitudinale équipée en géologie, géotechnique, résultats d'essais, niveaux d'eau reconnus et niveau de fondation proposé. - Calcul du taux de travail admissible. - Calcul de l'affouillement. - Calcul des tassements prévisionnels. - Recommandations relatives à l'exécution des fondations. - Consistance de l'étude spécifique éventuelle

(*) : Le B.E.T rédige une note préalable, destinée à l'administration et au laboratoire, et précisant pour chaque variante, en fonction des conclusions de l'étude de définition, les problèmes sols-structures posés (Mode de fonctionnement des structures de chaque variante, sensibilité aux tassements différentiels, chronologie de mise en charge, particularités du mode construction éventuellement).

TABLEAU III : EFFICACITE DES PRINCIPAUX MOYENS DE RECONNAISSANCE
EN FONCTION DE LA NATURE DES SOLS (OU) EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES RECHERCHES (extraît du F.O.A83)

Objectifs visés	Enquête préalable			Reconnaissance Normale				
	Sondage cuveté	Puits manuel	Sondage à la tarière	Pénétromètre dynamique	Pénétromètre Statique	S.P.T	Scissomètre	Présionomètre
	X	(2)	X (2)	X	XXX	XX	—	XX
Sable pulvérisant	X	XXX (2)	XX (2)	XX	—	X	—	XXX
Alluvions grossières	XX	XX (2)	XX (2)	X	XX	X	XXX	X
Argile Molle	XXX	XXX (2)	XXX (2)	X	XX	X	—	XX
Argile Moyenne	XX (1)	XXX	—	X	—	X	—	—
Argile Raides ou gonflantes	XXX	XX	—	X	—	X	—	XX
Roche Tendre	XXX	—	—	—	—	—	—	—
Roche Franc	XXX	—	—	—	—	—	—	—
Recherche d'un horizon porteur	XXX	XXX	XXX	XXX	XX	X	—	—
Recherche de couches molles	XXX	XXX	XXX	XX	XXX	X	—	X
Caractéristiques à la rupture	f sup f prof	XXX XX	XXX XX	X XX	XX (Sols fins)	X (Argile) XX (Sable)	XXX (Sols mous)	XX
Tassement de consolidation	XXX	XXX	XXX	—	X	—	—	X
Module de réaction	XX	XX	XX	—	X	—	—	XXX (Sols)

X : Procédé non efficace.
XX : Procédé donnant une indication plutôt qualitative.
XXX : Procédé relativement précis mais qu'il est prudent de recouper avec d'autres méthodes.

XXX : Procédé donnant les résultats les plus fiables.
(1) : Sondage à l'air de préférence.
(2) : Danger d'éboulement - nécessité de l'éviter.