Les sols pour l'ingénieur

Auteur :
BOULON Marc, Professeur retraité à l'Université Grenoble Alpes, 3SR (Laboratoire Sols Solides Structures Risques)

30-10-2018

Les sols très variés présents sur notre terre requièrent la compétence d'un ingénieur spécialisé pour mener à bien les projets de génie civil, en liaison avec d'autres spécialistes. Ce spécialiste met en lumière les propriétés des sols à prendre en compte, et les caractérise par des essais adéquats, de manière à ce que les fondations des ouvrages de génie civil soient suffisamment stables, avec une réserve de sécurité. Une attention particulière est portée aux outils de conception, modélisant l'interaction sol-structure durant la vie d'un ouvrage. L'auscultation du site environnant fournit un témoin permanent de l'état et des mouvements éventuels du sol support d'une construction durant toute sa vie. Aujourd'hui, au prix de travaux d'amélioration et de renforcement des sols, on parvient à implanter de très grands ouvrages sur des zones autrefois réputées impropres à toute implantation. Les méthodes actuelles de construction, de moins en moins perturbatrices en milieu urbain notamment, permettent de repousser les limites du possible au-delà de ce qui était autrefois imaginable.

1. Pourquoi les sols requièrent de l'attention

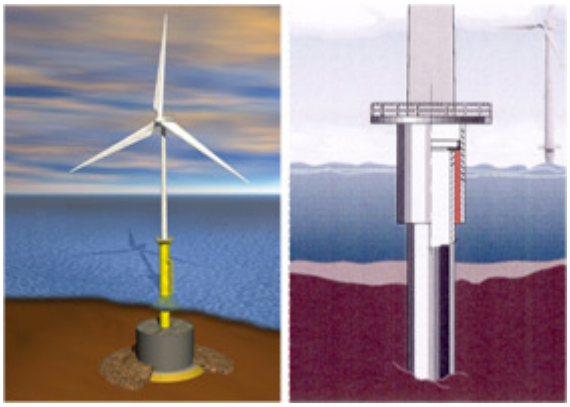


Figure 1. Éoliennes off-shore 5 MW, 30 m d'eau, 110 m émergés, à gauche embase poids de diamètre 30 m, sur sols rocheux durs (granite) ; à droite fondation sur monopile battu et/ou foré de diamètre 6 m, sur sols rocheux tendres (craie). [source : A. Puech, 2008, Cours de géotechnique marine, ENSHMG]

Parlons d'abord construction : Tous **les grands ouvrages terrestres** (barrages, ponts, viaducs, tours de grande hauteur, silos, réservoirs de produits pétroliers et chimiques, centrales de production d'énergie,…) nécessitent des fondations. Quant aux **ouvrages souterrains** (tunnels, galeries, usines souterraines, réservoirs de stockage de gaz,…) ils doivent supporter l'action (on dit couramment la poussée) du sol. Enfin, les ouvrages *off-shore*, qui subissent les éléments marins, puisent la stabilité de leur appui sur les fonds marins (structures poids, figure 1) ou de leur ancrage sur le fond marin (structures flottantes, sur jackets, figure 2, ou monopiles figure 1, oléoducs).



Figure 2. A gauche, un des éléments de jackets support d'une plateforme off-shore, jusqu'à 300 m d'eau, taille et poids comparable à ceux de la Tour Eiffel. A droite, jacket muni de caissons de flottaison, en cours de remorquage sur site ; fourreaux de guidage des pieux (diamètre 2 m, longueur 50 à 100 m) de clouage sur le fond marin sableux. [source : A. Puech, 2008, Cours de géotechnique marine, ENSHMG]

Mais le sol est un matériau « vivant », susceptible d'évoluer dans le temps sous l'effet de divers phénomènes naturels et anthropiques, prévus ou imprévus. On aura donc à traiter aussi, de **renforcement des sols** au contact de l'ouvrage, et de **remédiation** aux désordres pouvant survenir.

Un ingénieur spécialisé (l'ingénieur géotechnicien et plus souvent une équipe de géotechniciens) est en charge de l'interaction entre sol et ouvrage (interaction sol-structure). Il est bien entendu en étroite relation avec l'équipe responsable de l'ouvrage lui-même. Dans la suite de ce texte consacré aux sols, nous utiliserons par facilité le terme ingénieur pour désigner l'ingénieur géotechnicien.

Lorsque germe l'idée d'un grand ouvrage de génie civil, utile en principe, une partie de l'avant projet consiste à examiner de près tout l'environnement qu'il subira et qu'il modifiera. On doit ainsi consulter **les annales des phénomènes naturels locaux** susceptibles d'affecter les déformations et la stabilité de la construction au cours du temps (pluie, neige, sécheresse, inondation, tempête, gel-dégel, séisme, explosion,…). Mais une large étude d'impact (physique, hydraulique, écologique, socio-économique,…) est également indispensable pour évaluer les répercussions de l'ouvrage sur le site proche et lointain. L'intérêt des particuliers et l'intérêt général sont alors souvent en conflit. Par exemple, l'installation des barrages d'Assouan a complètement modifié les conditions de l'agriculture en Égypte : effets bénéfiques dans la haute vallée du Nil (irrigation), mais désastreux sur la basse vallée (salinisation des terres, absence d'alluvions annuelles fertiles).

Donc, si rien ne s'oppose fondamentalement à la construction, on entre dans la phase du projet (la conception précise de l'ouvrage et de son interaction avec le sol).

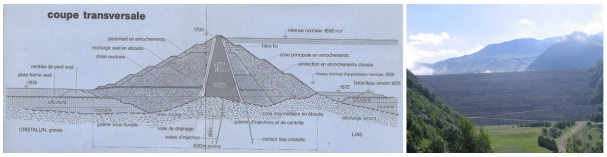


Figure 3. Le barrage en terre et enrochements de Grand-Maison, sur l'Eau d'Olle, dans les Alpes, mis en service en 1988. Un des grands barrages du monde, hauteur 140 m, longueur en crête 550 m. Ci-dessus coupe montrant le noyau (argileux d'étanchéité), le rideau d'étanchéité dans le lit de la rivière, complétant l'étanchéité, les recharges en enrochements, amont et aval, assurant la stabilité. A droite, photo du barrage et du réservoir, vus de l'aval. Ce barrage est la partie supérieure d'une STEP (station de transfert d'énergie par pompage, 1820 MW, 300 Gwh/an), permettant de stocker sous forme hydraulique l'énergie électrique non utilisée aux heures creuses. [Source : Gauche, Comité français des barrages et réservoirs, 2012, Technologie des barrages ; Droite, By Douchet Quentin [GFDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html) or CC BY-SA 3.0 (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0)], via Wikimedia Commons]

Sous le vocable sols, nous entendons les sols et les roches, situés sous la couche terrestre végétale et/ou organique. Ce sont des matériaux naturels, tous différents les uns des autres, par leur minéralogie, leur granulométrie, leur éventuelle cimentation, enfin par toute l'histoire de leur formation. On les regroupe néanmoins par grandes classes possédant des propriétés voisines, graviers, sables, silts ou limons, argiles, roches plus ou moins dures, plus ou moins tectonisées. L'eau est pratiquement toujours présente, saturant le sol (sous le toit de la nappe phréatique), ou accompagnée d'air (sol non saturé) au-dessus de la nappe. Dans un barrage en terre (figure 3) les matériaux sont soigneusement sélectionnés selon les zones.

2. Les propriétés importantes des sols et leur caractérisation

L'outil essentiel de l'ingénieur en charge du sol dans un projet de génie civil est la mécanique. Dès lors, ses propriétés les plus examinées sont ses **propriétés mécaniques et hydrauliques**, à savoir sa rigidité (module d'élasticité), sa résistance (cohésion et angle de frottement), sa tendance dilatante ou contractante à la rupture, sa perméabilité, et sa réaction à l'hydratation/déshydratation. L'anisotropie de ces propriétés est toujours considérée. La pression interstitielle dans un sol amène l'ingénieur à considérer les contraintes totales et les contraintes effectives, les secondes étant celles réellement supportées par le squelette du sol.

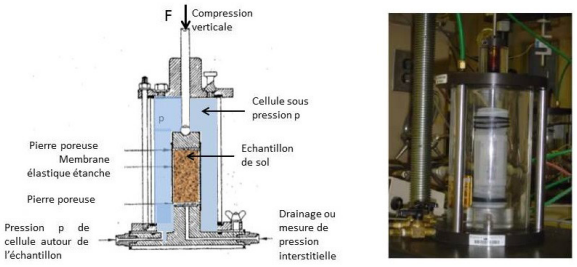


Figure 4. L'essai triaxial permet de caractériser la rigidité et la résistance d'un sol situé en profondeur. A gauche, principe de l'essai (métrologie non représentée). A droite, photo d'une cellule triaxiale. L'échantillon cylindrique est soumis à une contrainte de confinement p (simulant la profondeur), puis comprimé (force axiale F représentant l'action d'un ouvrage proche), des petites déformations jusqu'à la rupture. [source : Marc Boulon]

Un avant-projet d'ouvrage construit sur le sol/en sol nécessite l'identification du sol local. On parle de **reconnaissance des sols**. L'ingénieur va d'abord puiser ses premières informations auprès des géologues, les compléter par les dossiers –s'ils sont accessibles- de constructions voisines antérieures, et doit finalement commander soit des sondages/carottages (en vue d'essais de laboratoire –triaxial, figure 4, cisaillement direct, oedomètre, …-, soit des essais in situ (pénétromètre, pressiomètre, sismique réfraction, …).

Les essais de laboratoire fournissent directement des données hydro-mécaniques. Par contre, les essais *in situ* ne sont interprétables que par des corrélations avec les paramètres hydro-mécaniques, le tout avec une certaine incertitude. Les sondages, le pénétromètre, le pressiomètre fournissent des informations locales (selon une verticale), tandis que la sismique bien conduite renseigne sur le sol dans sa masse, mettant ses hétérogénéités en évidence. Bien d'autres techniques sont disponibles pour caractériser les couches du sous-sol : conductivité électrique, gravimétrie, radar, qui concourent en outre à déceler les cavités et les discontinuités –failles, fractures-.

3. Les outils de conception concernant le sol

Classiquement, on parle de la structure en projet (le pont, le barrage, la centrale,…), et du sol devant la supporter ou même la

constituer (barrage en terre, par exemple). Au cours de la vie de l'ouvrage, **l'interaction sol-structure est permanente**.

Muni des caractéristiques du sol local (§ 2), l'ingénieur évalue les charges de service et exceptionnelles de l'ouvrage sur le sol. Puis le projet se précise et l'on dimensionne complètement l'ouvrage en lui assurant un ou des **coefficients de sécurité**, obtenus en estimant des scenarii de rupture par majoration des charges, ou par minoration des caractéristiques du sol. Des **normes nationales et internationales** (notamment les eurocodes, l'eurocode 7 en ce qui concerne les sols) ont été élaborées, et progressivement affinées pour apprécier la sécurité, compte tenu des désordres et accidents historiques dûment enregistrés et médités. Mais les déformations réelles du sol et de l'ouvrage, avant toute rupture, sont également pertinentes en termes de santé de l'ouvrage.

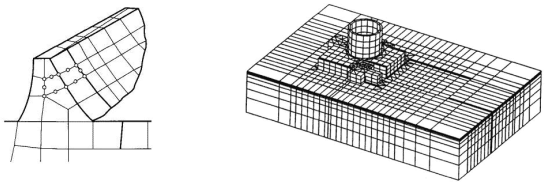


Figure 5. Maillage de 2 ouvrages en éléments finis. A gauche, un barrage (très simplifié) et sa vallée. A droite une centrale et son site proche. La méthode consiste à écrire l'équilibre mutuel et les déformations d'un grand nombre de petits éléments de volume, formés de matériaux possédant chacun leur rigidité et leur résistance. [source : MESTAT, P., (1997), Maillages d'éléments finis, conseils et recommandations, BLPC 212, 39-64]

L'ingénieur dispose d'**outils de modélisation** du fonctionnement d'un ouvrage et du site environnant, selon des méthodes classiques ou plus évoluées. On notera que ces méthodes s'améliorent en permanence, grâce au dialogue entre les professionnels et les chercheurs. Les méthodes classiques sont principalement orientées vers la sécurité. Elles supposent le sol rigide plastique, c'est-à-dire ne se déformant pas avant qu'il se rompe brutalement. Les méthodes numériques plus récentes (en particulier la méthode des éléments finis, Figure 5) confèrent au sol des lois constitutives complètes traduisant les déformations jusqu'à la rupture, et la rupture elle-même. Elles donnent accès tout à la fois à l'évaluation de la sécurité, et aux déformations de l'ouvrage en service et du sol (typiquement un barrage et sa vallée proche). Aujourd'hui, les méthodes classiques et récentes cohabitent dans la profession.

Nous venons d'évoquer la modélisation numérique (éléments finis) comme bon outil prédictif pour l'ingénieur. Mais la prédiction ne peut être satisfaisante que si les données hydro-mécaniques qui l'alimentent sont représentatives. Or la caractérisation initiale des sols (§ 4), au moment du projet, est toujours approximative, du fait simplement de l'hétérogénéité du sous-sol. Par exemple, les mineurs creusant un tunnel ou une galerie vous disent qu'ils ne connaissent vraiment le sol traversé que lorsqu'ils l'excavent, à l'avancement. C'est là que la puissance de la modélisation numérique par éléments finis peut être mise à profit. On simule le phasage des travaux (les étapes successives de la construction), dont on compare les résultats aux mesures sur site pendant ces travaux, depuis l'origine (le site vierge), des modifications des variables hydro-mécaniques du sol (déplacements, contraintes, pressions interstitielles,…). On a ainsi les bases d'une analyse inverse, permettant de **corriger les paramètres de projet du sol, au fur et à mesure du déroulement de la construction**. D'où une simulation définitive plus réaliste du comportement de l'ouvrage en service, et sous chargement exceptionnel. Cette méthode dite observationnelle permet aussi de repenser le projet initial, au cas où il aurait été trop audacieux, au point de ne plus remplir les critères de sécurité.

4. L'auscultation des ouvrages et des sols

Les mesures accompagnant la construction de l'ouvrage, sur le sol et l'ouvrage lui-même, viennent d'être évoquées (§ 3). Mais un ouvrage et son site ont une vie très longue, après construction. Pour les grands ouvrages, ainsi que pour les situations à risques en cours (glissement de terrain, éboulement rocheux,…) et identifiées, **des mesures programmées des variables hydro-mécaniques de site sont courantes**, constituant l'auscultation. Pour être utile, cette démarche nécessite une interprétation et une diffusion rapides, en temps réel. Ainsi, sur un glissement, une accélération des mouvements sans modification des charges signifie une évolution rapide vers la rupture brutale, et doit déclencher l'alerte des populations menacées. Les ouvrages (et leur site) couramment auscultés sont les barrages (et les versants de leur vallée), les centrales de production d'énergie, les ponts et viaducs (pour lesquels on redoute les tassements différentiels), les tunnels et galeries (pour lesquels on veille à une convergence limitée, résultant du mouvement des failles traversées, ou de l'altération de la roche encaissante. Les appareils installés sont des extensomètres, des inclinomètres, des tassomètres, des capteurs de pression interstitielle et de niveau de nappe phréatique, des outils de relevé topographique,…

Autrefois (à l'échelle du/des siècle(s)), l'ingénieur disposait d'instruments frustes de mesure (théodolite pour les déplacements, niveau pour les inclinaisons,…). Nous sommes aujourd'hui loin de ces technologies de mesure, qui ont toutefois fait leurs

preuves. Les nouvelles technologies ont une place de choix en géotechnique. Les mesures topographiques de mouvements sont aujourd'hui menées rapidement, automatiquement, et précisément grâce au GPS. Les mesures extensomètriques et inclinométriques font appel à la fibre optique. En tunnels ou galeries, tous les guidages et mesures de convergence reposent sur des techniques laser. Des drones et la technique d'analyse d'images sont utilisés pour le suivi de l'état des parements de grandes dimensions (barrages, ponts,…). Et bien d'autres nouvelles technologies sont appelées à figurer au panel des outils d'auscultation.

5. L'amélioration et le renforcement des sols



Figure 6. Un mur de soutènement de grande hauteur en « terre armée ». Chaque niveau de mur est constitué d' « écailles » jointives en béton armé ancrées par frottement dans le remblai amont grâce à des tiges métalliques. Le remblai est construit au fur et à mesure de l'érection du mur. Cette technique permet de réaliser des parois esthétiques, sub-verticales stables, et drainantes. [source : E. Lucas, P. Sery, A. Tigoulet, D. Brancaz, 2008, Les ouvrages récents de grande hauteur en sol renforcé, Compte rendus JNGG 2008, Nantes]

On peut renforcer préventivement les sols, ou remédier à des déformations, attendues ou non, sous ou au voisinage d'un ouvrage. Les méthodes d'amélioration préventive sont nombreuses. Citons **la compaction**, qui est un écrouissage du sol, pratiquée par rouleaux éventuellement vibrants, ou par action dynamique (chute de lourdes masses sur le sol, explosions au niveau du sol). Dans le cas des sols très fins gorgés d'eau, on choisit **le drainage et la consolidation,** par la pose de drains, ou un système d'électro-osmose, ou en mettant à profit la pression atmosphérique par le vide sous une membrane superficielle étanche. Mais le géotechnicien doit toujours être patient ! Le **renforcement par nappes géotextiles, micro-pieux, clouage**, est très courant. En particulier, le clouage, à l'aide de barres d'acier scellées dans un forage, passif ou actif (mise en tension après scellement), est très pratiqué pour stabiliser les pentes rocheuses, et les parois de tunnels suspectes. On rencontre souvent, le long des routes et autoroutes, des remblais armés (Figure 6).



Figure 7. Le viaduc à haubans de Rion-Antirion, en béton armé et acier, mis en service en 2004, traverse le détroit de Patras en Grèce, très sismique, par 65 m d'eau, dont le fond marin est constitué d'une épaisse couche principalement argileuse et molle. Long de 2883 m, reposant sur 4 piles d'un diamètre de 90 m et d'une portée maxima entre piles de 560 m, il cumule les mesures préventives. L'argile située sous les piles est renforcée par une forêt de pieux métalliques, de 30 m de long, ce qui interdit une rotation d'ensemble sol-pile. Ces pieux sont surmontés par une couche granulaire fusible (blocs de basalte), permettant un déplacement relatif horizontal (glissement irréversible) pieux/piles lors des séismes importants. A gauche vue du viaduc. A droite principe d'amélioration du sol de fondation. [source : Gauche, By David Monniaux (Own work) [GFDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html), CC-BY-SA-3.0 (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/) or CC BY-SA 2.0 fr (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/fr/deed.en)], via Wikimedia Commons. Droite, Marc Boulon]

Les remédiations aux mouvements du sol au cours du temps, programmées ou non, sont courantes. Pour corriger les tassements différentiels entre piles de ponts, on pratique un vérinage périodique du tablier. Des vérins ont été placés entre les fondations et les pieds de la Tour Eiffel. Au centre de Mexico, zone argileuse très sensible aux séismes, de grands immeubles sont construits sur pieux surmontés de vérins de manière à corriger l'inclinaison du bâtis consécutive à chaque grand séisme. Le viaduc à haubans de Rion Antirion (Figure 7), est également conçu pour supporter des séismes.

La technique le plus utilisée, dans le monde entier, pour pallier les tassements différentiels est l'injection de coulis de ciment sous les zones de fondations connaissant un excès de tassement. Mais une autre technique originale s'est développée récemment.

L'inclinaison préoccupante et croissante de la Tour de Pise et de la cathédrale de Mexico, construites sur une épaisse couche d'argile, a été traitée, en partie, par sous-excavation, ou extraction d'argile sous la zone de fondation la plus haute. Le redressement de ces édifices n'était pas visé, mais plutôt la stabilisation de leur inclinaison (outre prudence technique, la manne touristique doit être protégée…).

6. Tendances et performances actuelles



Figure 8. Exemple de tunnelier. Les tunneliers, sont de plusieurs types selon le sol traversé, à pression de terre, à pression de boue, à pression d'air. La pression est destinée à stabiliser le front d'abattage. Ce sont de véritables usines sur rails, extrêmement puissantes. Les principales parties sont essentiellement, dans l'ordre : la roue de coupe, le tapis de convoyage des déblais vers l'arrière, un bouclier si le sol est meuble, des vérins de réaction à la poussée sur la roue, la jupe d'échappement tronconique, l'érecteur de voussoirs (préfabriqués), des wagons de stockage. A l'extérieur une station de traitement de la boue si pression de boue. [source : © PHOTOPQR/LE PROGRES/PHILIPPON JOEL]

Les travaux sans tranchée sont préférés aux terrassements chaque fois qu'ils sont possibles, car généralement sans nuisance pour la population. Du petit au grand diamètre, citons **les forages dirigés**, qui permettent par exemple d'installer une conduite (diamètre décimétrique) non rectiligne sous un remblai, de route, de voie ferrée, ou même sous une rivière si le sol s'y prête. **Les micro-tunneliers** offrent une perspective intéressante pour percer des galeries de taille métrique. Enfin, **les tunneliers** (figure 8), de taille décamétrique, sont utilisés pour construire des galeries même en terrain très meuble (sable, argile), saturé (cas du tunnel sous la Manche), à très faible profondeur (clé de voûte à moins de 10 m de la surface du sol) ou à très grande profondeur (tunnel du Saint-Gothard en Suisse, projet du tunnel ferroviaire Lyon-Turin avec une couverture maxima de 2500 m de roche –et d'eau !-). Tous ces nouveaux outils sont grands consommateurs d'énergie !

Les pieux sont des modes de fondation privilégiés en terrain meuble, forés ou battus, atteignant couramment plusieurs mètres de diamètre et la centaine de mètres de longueur en off-shore. Les chargements cycliques font l'objet de recherches actives, en raison du phénomène dit de dégradation cyclique. Dans la mesure où la capacité des fondations est presque sans limite, pourvu qu'on y mette le prix, les ouvrages eux-mêmes changent de nature. Par exemple, **les ponts et viaducs à haubans**, auto-stables (Millau, Rion-Antirion,…), prennent le pas sur les ponts suspendus

On expérimente aujourd'hui, à terre, **les pieux géothermiques**, à fonction double, fondation et échangeur de chaleur.

Bien d'autres innovations sont à venir, qui mobiliseront les nouvelles générations…

Références et notes

Image de couverture : Le barrage de Grand'Maison par Douchet Quentin [GFDL ou CC BY-SA 3.0], via Wikimedia Commons

---

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** BOULON Marc (2018), Les sols pour l'ingénieur, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=2866

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.