

Réflexions sur la place des essais de laboratoire dans la pratique de la géotechnique

Jean-Pierre Magnan
Directeur technique
Chargé du domaine Géotechnique
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Introduction

Les essais de laboratoire connaissent une certaine désaffection dans les études de géotechnique, où l'exécution d'essais en place (pressiomètre, pénétromètre, etc.) a augmenté dans la plupart des pays au cours des dernières années. Les essais de laboratoire conservent toutefois un rôle majeur pour certains types de problèmes ou d'ouvrages et offrent un accès direct aux paramètres indispensables pour les calculs numériques par la méthode des éléments finis, dont l'utilisation croît parallèlement aux évolutions des techniques de caractérisation des sols.

La place des essais de laboratoire dans la pratique de la géotechnique mérite donc une réflexion approfondie, qui est ébauchée dans cette note.

On peut porter différents regards sur cette question. Nous l'examinerons successivement du point de vue des facteurs qui peuvent influencer localement cette pratique, puis du point de vue des besoins des calculs, du point de vue des limites des essais et du point de vue d'une pratique harmonieuse et efficace de la géotechnique.

Les facteurs des pratiques de caractérisation des sols

La pratique des études géotechniques, qui dépend beaucoup de l'expérience accumulée au fil des ans lors de l'élaboration de projets, est diversifiée. La coexistence de méthodes concurrentes, fondées sur des essais spécifiques, des méthodes de calcul et des critères d'acceptabilité différents, est reconnue dans les textes normatifs nationaux et internationaux et elle est considérée comme normale par les géotechniciens, conscients de la diversité et de la complexité des sols et roches que l'on peut rencontrer à la surface du globe terrestre et du caractère conventionnel et des limites des méthodes qu'ils utilisent. La géotechnique diffère en cela d'autres domaines, comme le calcul des struc-

tures où un système de modélisation unique est utilisé partout. L'examen des textes décrivant les pratiques recommandées dans différents pays montre qu'une grande liberté est habituellement laissée au projeteur, avec en contrepartie sa responsabilité sur les résultats.

Importance des ouvrages

Un premier facteur des pratiques de caractérisation des sols et de calcul géotechnique est l'importance (et la complexité) des ouvrages, qui interagit avec les budgets disponibles et les délais imposés par les maîtres d'ouvrages (propriétaires) ou leurs délégués.

L'importance (la valeur) de l'ouvrage ou des travaux à exécuter est naturellement un facteur décisif pour le choix de ce qu'il est possible (ou raisonnable) de faire au niveau des études. L'édition d'un abri de jardin, d'une maison individuelle, d'un immeuble ou d'une centrale nucléaire ne peut se faire avec les mêmes techniques : de même, on ne peut regrouper la construction d'une autoroute ou d'une voie de train à grande vitesse, celle d'un chemin local et celle d'une voie forestière. Les coûts des forages, sondages et essais, qu'ils soient réalisés sur le terrain ou en laboratoire, ne dépendent pas de l'ouvrage étudié et la moindre étude peut avoir un coût excessif pour un petit ouvrage. Il ne faut pas en déduire que certaines constructions peuvent être effectuées sans étude géotechnique. On peut trouver des informations sur les sols en examinant le voisinage de l'ouvrage ou bâtiment à construire (notamment lorsque des constructions ont été réalisées à proximité). On peut utiliser des modes de reconnaissance sommaires (excavation à la pelle mécanique jusqu'à la profondeur où l'influence des travaux se fera sentir, pénétromètre dynamique léger)... l'important étant de détecter les problèmes majeurs susceptibles de perturber le bon fonctionnement de l'ouvrage, voire de le détruire, pour ne pas laisser construire des ouvrages dangereux.

L'existence de contraintes liées à l'importance des ouvrages (pour la sécurité des biens et des personnes), à leur valeur et à la complexité géotechnique du site est prise en compte dans la future norme européenne EN 1997-1 (Eurocode 7) qui distingue une catégorie d'ouvrages « simples », pour lesquels des modes de justification simplifiés sont autorisés, et développe d'autre part la notion de catégorie géotechnique, pour adapter les règles à l'ampleur des problèmes à traiter.

Délais des études

Un autre facteur essentiel de la pratique des reconnaissances et études géotechniques est le temps. Bien qu'il soit difficile de quantifier une telle affirmation, les géotechniciens s'accordent à dire que leurs clients sont de plus en plus pressés. Ils ont l'impression que le délai réel entre l'idée et la livraison d'un ouvrage n'a pas vraiment diminué, mais qu'autrefois leur part dans ce délai était plus grande, la priorité étant maintenant donnée aux discussions d'opportunité et à la mise en place des financements. Leur revendication n'est pas nécessairement de revenir à la situation antérieure, mais qu'on leur laisse le temps de travailler correctement. L'intérêt d'une étude géotechnique « normale » n'est visible que dans le coût des ouvrages : une étude géotechnique insuffisante, faute de temps (ou d'argent), produit soit un projet plus « précautionneux » (donc plus cher) si le géotechnicien a conscience des effets possibles de ce qu'il n'a pas pu étudier, soit des incidents ou accidents en cours de travaux ou après. Le raccourcissement des délais d'études a une influence directe sur le choix d'essais en place ou d'essais de laboratoire. Les essais en place ont la réputation justifiée d'être plus rapides et moins chers. Les essais de laboratoire nécessitent des prélèvements de matériaux intacts, pas toujours faciles. Les essais réalisés sur les sols argileux, raides ou mous, ont des durées importantes. Les essais de flUAGE sont par nature assez longs mais ils ne peuvent être exécutés qu'en laboratoire. L'emploi systématique d'essais en place faute de temps serait une évolution dommageable si elle devenait la règle de fait. Peut-être faudra-t-il un jour définir des règles de référence obligatoires par type d'ouvrage.

Les habitudes locales

Comme cela a été indiqué plus haut, la pratique de la géotechnique a une forte

Note

technique

composante locale. Certains pays utilisent des matériels d'essais, avec les méthodes de calcul associées, qui leur sont spécifiques, comme l'essai de cellule (« Cell test »), forme d'essai triaxial à une seule éprouvette développé et utilisé en Belgique et aux Pays-Bas, l'essai suédois de sondage par poids (« Weight sounding test ») qui consiste à charger une tarière hélicoïdale vissée dans le sol jusqu'à la profondeur voulue. La pratique de l'essai pressiométrique en France avant son extension à d'autres pays était aussi une pratique locale typique. Contrairement à ce que l'on pouvait noter il y a une vingtaine d'années, on ne note pas de pratiques locales qui favoriseraient ou défavoriseraient de façon particulière les essais en laboratoire par rapport aux essais en place. Le choix de l'un ou l'autre de ces types d'essais est plus lié à la nature des sols et au type d'ouvrage étudié.

Les prescriptions des normes

Certaines normes imposent des types d'essais pour étudier un type d'ouvrage géotechnique particulier. C'est le cas du Fascicule 62, Titre V du CCTG (Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de l'État et des collectivités territoriales) en France, qui limite le calcul des fondations profondes et superficielles aux méthodes pressiométrique et pénétrométrique. Les études de matériaux pour les barrages (et plus généralement les remblais) sont pour leur part effectuées systématiquement en laboratoire.

Toutefois, comme cela a déjà été noté, la tendance actuelle est à la liberté/responsabilité des géotechniciens dans le choix des méthodes de reconnaissance et justification des ouvrages. Cette évolution rappelle les débats relatifs à l'exonération de responsabilité individuelle en cas de respect des normes. Cette exonération était inscrite dans le préambule des normes de l'ancienne Union Soviétique et l'on trouve dans les normes allemandes actuelles, dont elles avaient repris l'esprit, des tables de valeurs de calcul forfaitaires des propriétés des sols à utiliser dans les avant-projets qui peuvent aller dans ce sens.

Une autre particularité des systèmes de normalisation en vigueur en Europe est que le rôle des normes est différent selon les pays. La France, qui impose le respect des normes dans les projets à financement public, est une exception à cette égard. Dans beaucoup de pays, l'application des normes est volontaire et des règles complémentaires ou diffé-

rentes peuvent être imposées par certains maîtres d'œuvre ou ministères. Il y a dans ce cas possibilité de prescriptions parallèles différentes.

Les capacités des essais

Un facteur très important pour le choix des types d'essais qui permettront de caractériser les sols (ou les roches) pour une étude géotechnique est la nature des sols ou roches à tester. Les essais de laboratoire sont bien adaptés aux sols argileux, aux sols organiques, aux roches etc., c'est-à-dire aux matériaux que l'on peut prélever sans les détruire et tester en laboratoire dans des appareils de dimensions courantes. Ils permettent en général de déterminer plus de paramètres de comportement que les essais en place que l'on peut éventuellement leur substituer. Mais ils ne permettent pas de tester tous les types de sols. Les sols grossiers (contenant des particules de grandes dimensions, typiquement plus de quelques centimètres) ne peuvent être testés dans ces appareils. Les sols les plus résistants (sols raides ou roches tendres) nécessitent des moyens d'essais spécifiques de forte capacité. Cette limitation des possibilités des essais de laboratoire est implicitement prise en compte dans les procédures d'étude.

L'influence de la géologie

Quand on réfléchit aux causes des différences qui existent entre les pratiques de la géotechnique dans différents pays, les conditions géologiques locales jouent un rôle essentiel : les différences des pratiques sont liées avant tout à la nature des terrains, car les résultats des recherches réalisées depuis plus de cinquante ans sur les comportements des sols et des ouvrages ont été largement partagés par les ingénieurs et enseignants de tous les pays concernés et ne sont plus une source de différences entre pays. La géologie permet de comprendre pourquoi certaines méthodes d'étude ont été particulièrement développées dans certains pays : sols mous et organiques des Pays-Bas, argiles sensibles des pays scandinaves, zones sismiques, sols raides, sols non saturés des pays plus chauds et secs, problèmes de gel et dégel, sols gonflants, sols solubles, etc.

Les méthodes de dimensionnement et les méthodes de reconnaissance sont aussi adaptées aux types de problèmes à résoudre. Pour donner un exemple, l'élaboration des projets de fondations profondes n'est pas la même pour des

pieux appuyés en pied sur une couche résistante surmontée de sols très compressibles et pour des pieux flottants dans des sols moyennement résistants. Dans le premier cas, la question essentielle est de repérer la position du substratum dans lequel un encastrement de l'ordre du mètre sera suffisant. Dans le second cas, il faut caractériser le frottement futur du sol contre le pieu, qui conditionne l'essentiel de la portance, et ce frottement est réparti sur toute la longueur du pieu. Un pénétromètre de puissance moyenne est adapté pour la première situation. Un pénétromètre plus lourd ou un pressiomètre est plus volontiers utilisé pour les pieux flottants dans des sols résistants sans substratum porteur.

Pour donner un second exemple, les études de remblais sur sols compressibles diffèrent selon la valeur du rapport de l'épaisseur de la couche à la largeur du remblai. L'expérience accumulée depuis une cinquantaine d'années, notamment en France, lors de la construction des remblais routiers porte sur des situations où ce rapport est de l'ordre de 0,5, ce qui permet d'obtenir de bons résultats avec des calculs unidimensionnels. Pour des valeurs plus fortes de ce rapport, le problème devient bidimensionnel et les méthodes d'analyse doivent être adaptées. Les conditions géométriques des sols dans les projets dépendent directement de l'histoire géologique du site de l'étude.

L'organisation des professions

Un autre facteur du choix des méthodes d'étude et de reconnaissance des sols dans la pratique est l'existence de règles imposées aux projeteurs mais aussi à ceux qui financent des projets. Concrètement, on observe que les grandes organisations qui combinent la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, le bureau d'études et le laboratoire sont aptes à établir des doctrines et des règles pour optimiser la conception et la construction des ouvrages parce qu'elles ne cherchent pas à isoler les responsabilités des différents maillons de la chaîne mais acceptent collectivement la responsabilité du résultat. Il en existe de nombreux exemples dans le monde. On peut citer comme exemple l'organisation du génie civil public en France dans la seconde partie du vingtième siècle.

L'autre extrême est caractérisé par l'existence de peu de règles et plutôt d'une mise en concurrence des différents acteurs de l'acte de construire. En l'absence de règles imposées, la mise

en concurrence peut produire des effets incontrôlés, ce qui implique l'existence d'un système de maîtrise de la qualité... dont on attend qu'il assure une qualité correcte des ouvrages. La définition moderne de la qualité comme ce qui répond aux besoins (à la demande) du client n'est pas en soi rassurante : un client sans exigences peut être facilement satisfait, surtout s'il n'a qu'une vague idée des questions que traitent les études géotechniques. Les efforts récents de la profession géotechnique en France pour définir des cadres types de commande des études géotechniques (norme NF P 94-500) sont une première réponse à cette situation nouvelle. Beaucoup de géotechniciens s'interrogent sur l'opportunité d'aller plus loin et de définir aussi le contenu des études par des textes dont l'application serait de fait obligatoire et qui garantiraient ce qui a été considéré historiquement comme la « qualité », c'est-à-dire la conformité du travail à ce qu'il doit être, sans qu'il soit besoin de l'imposer par contrat aux différents acteurs (le « sachant », ici le géotechnicien, ayant l'obligation de travailler selon les règles de l'art, en tenant compte des intérêts de son client).

Les besoins des calculs

Méthodes de calcul classiques (hors éléments finis)

Le fonctionnement de chaque type d'ouvrage géotechnique met en jeu des aspects spécifiques du comportement des sols. Les méthodes de calcul correspondantes n'ont donc pas les mêmes besoins, mais elles se rattachent toutes à deux approches de la description du sol. On peut distinguer :

- ① les méthodes qui utilisent le formalisme de la mécanique des milieux continus, dans sa version adaptée au comportement mécanique des sols, et
- ② les méthodes qui passent directement de résultats d'essais à l'estimation du comportement de l'ouvrage.

La plupart des méthodes de calcul utilisent le formalisme des contraintes et des déformations : méthodes de calcul de la stabilité des pentes, de calcul des poussées et butées sur les soutènements, calculs de consolidation et tassement, tous les calculs en éléments finis. Les paramètres sont des modules, des coefficients de Poisson, des paramètres de fluage, des paramètres de résistance (c , φ , etc.).

Les méthodes développées à partir des résultats d'essais en place (pressiomè-

tre, pénétromètres statiques et dynamiques) sont généralement du second type.

Sans entrer dans le détail de la description des méthodes de calcul des différents types d'ouvrages géotechniques, qui sont exposées dans de nombreux ouvrages, on peut résumer comme suit la situation actuelle des essais de laboratoire et des essais en place :

- les *fondations profondes* sont dimensionnées sur la base *d'essais en place*, avec parfois des tables de valeurs de portance en fonction de la nature et de l'état des sols et, aussi de la nature des fondations et de leur méthode d'exécution (pieux refoulant le sol, pieux sans refoulement du sol, notamment). L'avenir des approches fondées sur la description des sols en contraintes et déformations est peu favorable, car la modélisation de l'exécution du pieu, qui a un effet majeur sur son comportement, est très (trop ?) complexe. Néanmoins, certains problèmes d'interaction avec d'autres ouvrages ou d'autres fondations profondes ne semblent solubles que par la méthode des éléments finis et on peut espérer que ce problème trouvera un jour proche une solution ;
- pour les *fondations superficielles*, la concurrence est ouverte entre les méthodes d'analyse en contraintes et déformations et les méthodes de prévision directe à partir d'essais en place. Des approches mixtes où le formalisme est celui de la mécanique des milieux continus/sols mais les paramètres sont déduits par corrélations d'essais en place sont aussi souvent utilisées ;

• le *calcul des soutènements* s'appuie sur les paramètres de résistance au cisaillement c et φ , pour les murs, qui posent des problèmes spécifiques car le sol en contact avec l'arrière du mur est souvent un remblai... dont le compactage a une influence importante sur le résultat. Pour les rideaux, les calculs sont soit de type *poussée-butée*, avec des paramètres déterminés usuellement à partir d'essais de laboratoire, soit de type « *module de réaction* », auquel cas la détermination du coefficient de réaction est complexe, une solution consistant à le déduire d'essais pressiométriques ;

- les *calculs de stabilité des pentes* utilisent le formalisme de la mécanique des milieux continus/sols, avec des paramètres c et φ qui sont soit déterminés en laboratoire, soit déduits de l'analyse à rebours de la stabilité de glissements déclarés ;
- les *calculs de comportement des corps de remblais ou de barrages* s'appuient sur des paramètres détermi-

nés en laboratoire, quand on connaît les matériaux qui seront utilisés et qu'on peut faire des essais de compactage et des essais mécaniques sur les matériaux compactés à l'optimum ;

- les *études de remblais sur sols compressibles* s'appuient pour leur part sur des *essais de laboratoire*, avec utilisation d'essais en place au scissomètre. Certains paramètres (cohésion non drainée) sont parfois déduits d'essais en place (pressiomètre, pénétromètre statique), mais le fluage et la consolidation dépendent toujours des essais de laboratoire ;
- les *calculs de justification des ouvrages en zone sismique* portent sur trois types de problèmes : la liquéfaction des sols lâches, les déformations des sols sous l'action d'ondes de contraintes et l'analyse de la propagation des ondes sismiques dans les sols et roches. Les *études de liquéfaction* s'appuient sur des concepts issus de la mécanique des milieux continus/sols mais en pratique on utilise les *sondages au carottier battu* (SPT) ou au *pénétromètre statique* pour détecter l'existence de sols liquéfiables sur les sites sensibles. Pour les *autres types de calculs*, on s'appuie directement sur les concepts de la mécanique des milieux continus/sols, et sur des *essais de laboratoire*.

Les calculs en éléments finis

Les calculs par la méthode des éléments finis s'appuient sur le formalisme de la mécanique des milieux continus, c'est-à-dire qu'ils nécessitent des paramètres (modules, résistances, fluage) que l'on détermine habituellement en laboratoire. Le développement des calculs en éléments finis est donc *a priori* favorable au maintien voire au développement de ce type d'essais. Toutefois, l'exploitation d'essais en place peut fournir certains des paramètres de calcul, ce qui est intéressant pour caractériser les terrains que l'on ne peut prélever intacts ou pas tester avec les matériels existants dans les laboratoires d'essai. Les recherches sur l'application des calculs en éléments finis et la détermination de leurs paramètres se poursuivent et permettront d'y voir plus clair dans quelques années.

Les limites des essais

Qu'ils soient réalisés en place ou en laboratoire, les essais d'identification et de caractérisation mécanique des sols et des roches ont tous des limites, dues à leurs possibilités techniques, à la complexité de leur réalisation, à la représen-

tativité de leurs résultats, à leur durée et à leur coût, ainsi qu'à la complexité et au coût des appareils nécessaires pour réaliser les essais.

■ **Les limites techniques des essais** concernent la possibilité de tester des types de sols particuliers dans les gammes de chargement des ouvrages futurs (impossibilité de réaliser des essais sur des sols comportant des particules de dimensions trop grandes pour les appareils ; nécessité d'appliquer dans certains cas des pressions ou forces dépassant les capacités des matériels d'essai ; capacité ou non d'imposer l'état initial du sol en début d'essai). De ce point de vue, les principales limitations des essais de laboratoire sont liées aux dimensions des appareils, conçus pour tester des argiles, marnes ou sables fins plutôt que des matériaux d'éboulis ou des sols indurés très résistants. Par contre, l'essai de laboratoire permet en général de mieux contrôler les charges appliquées au sol pendant l'essai, de parcourir des chemins de contraintes plus variés, de maîtriser les conditions hydriques et les pressions interstitielles.

■ Il ne faut pas sous-estimer les difficultés associées à la **complexité des procédures d'exécution des essais**. Le prélèvement de carottes de sols intacts est très difficile dans certains sites. Certains asservissements en contraintes ou déformations sont complexes à programmer dans les essais de laboratoire. Mais la situation peut être aussi complexe pour les essais en place : l'exécution des forages pour essais pressiométriques peut être problématique dans certains sols...

■ La **représentativité des essais** est une hypothèse implicite de toutes les études de sols, mais elle doit être vérifiée pour chaque étude. Il est fréquent que les éprouvettes choisies pour les essais soient les plus faciles à tailler dans une carotte, donc par exemple les parties argileuses dans un multicouche de sable et d'argile... Il faut aussi que les éprouvettes aient les propriétés du sol en place, donc n'aient pas été perturbées par les opérations de prélèvement, de transport, de conservation et de taille. Il faut enfin que les prélèvements aient été effectués en des endroits représentatifs du site.

■ Deux facteurs (le **coût et la durée des essais**) influencent aussi les stratégies de reconnaissance des sols : la durée des essais en place est en général beaucoup plus faible que celle des essais de laboratoire, y compris le prélèvement des échantillons sur le terrain.

Sans aller jusqu'aux essais de fluage, dont la durée atteignait plusieurs mois il y a vingt ans, ou aux essais triaxiaux consolidés drainés qui peuvent durer un mois ou plus dans les sols fins peu perméables, les essais courants (œdémètre, essais triaxial consolidé non drainé, etc.) durent quelques semaines, alors que les essais en place peuvent en général être réalisés dans la journée. Il est donc naturel qu'ils tentent les géotechniciens pressés... Le coût des essais est en général directement lié à leur durée et est donc moindre pour les essais en place. Le coût des investissements est important dans les deux cas (sondeuses, carottiers, presses triaxiales, etc.) mais est réparti sur un plus grand nombre de sondages et essais dans les essais en place. Le coût et la durée sont souvent décisifs dans les choix, quand il n'y a pas d'exigences techniques particulières pour le contenu de l'étude géotechnique. Le rôle des spécialistes de la géotechnique est de faire que ces facteurs ne soient pas aussi décisifs quand on a besoin d'essais plus longs et onéreux.

nature et l'état des sols. Par ailleurs, les essais de laboratoire permettent d'accéder à des aspects de comportement que les essais en place ne permettent pas d'atteindre, tandis que les essais en place peuvent être plus respectueux de l'état initial du sol.

Cette liste pourrait être encore allongée... Elle témoigne de l'imbrication des techniques de reconnaissance et caractérisation des sols, imbrication souhaitée par la communauté des géotechniciens pour faciliter la pratique harmonieuse de leur métier.

Conclusion

Ces quelques réflexions sur la place des essais de laboratoire dans la pratique de la géotechnique ont été initiées par des journées d'études organisées à Paris en novembre 2000 par l'École nationale des Ponts et Chaussées sur « les essais de laboratoire en géotechnique : nouvelles techniques et applications ». L'idée initiale était de décrire les pratiques différentes des pays européens, mais il est apparu que ces pratiques n'étaient en fait pas différenciées par des préférences « arbitraires » mais au contraire étaient plutôt liées au contexte géologique et historique du développement de la géotechnique et dépendaient principalement du type d'ouvrage étudié. Pour les études courantes de fondations profondes, il est clair que les essais de laboratoire ne sont plus utilisés. Pour les autres types d'ouvrages, la situation n'est pas aussi tranchée. On peut imaginer que le développement des calculs numériques pour les études d'interaction favorisera la demande de paramètres de calcul déterminés usuellement en laboratoire, mais que ces paramètres pourront être au moins partiellement déduits d'essais en place. Certains aspects du comportement des sols restent toutefois inaccessibles aux essais en place actuels (effets du temps, évolution des comportements avec le niveau de contraintes, etc.) et il est important de conserver des laboratoires qui permettent de les déterminer quand c'est nécessaire. La détermination des paramètres d'interaction entre sols et structures (contacts entre sols et béton, acier, géosynthétiques, etc.) est un autre champ de concurrence entre des essais de laboratoire, des essais d'arrachement en place, voire des procédures d'évaluation forfaitaire pour lequel les pratiques doivent encore être fixées. Ainsi, l'avenir devrait voir un partage de l'activité entre laboratoire et activités de terrain plutôt qu'une domination définitive d'un type d'essais sur l'autre.