

INVESTIGATIONS NECESSAIRES POUR LES ETUDES
DES OUVRAGES D'ART

Rapporteur coordinateur :

M. NACIRI Chef de Laboratoire
Central de Géotechnique
LPEE

Rapporteurs :

M. MORGENTHALER
Directeur de S.I.F. Maroc
M. JAAOUANI
Ingénieur au L.C.G.
LPEE
M. ESPRESSATI
Chef de Laboratoire Centre
de physico-chimie des matériaux
LPEE

I - INTRODUCTION

Ce thème a été retenu par la Commission Technique d' Ouvrages d'Art de l'A.M.P.C.R. pour rappeler aux ingénieurs Routiers la nature et l'importance des investigations à faire sur le site d'un futur ouvrage en vue d'aboutir à une conception optimale répondant aux besoins à satisfaire, n'apportant aucune gêne à d'autres exploitants, bien définie sur le plan technique à travers un C.P.S. précis relatant notamment les conditions d'exécution et susceptible enfin de donner lieu à une réalisation de bonne qualité.

La qualité étant entendue au sens large c'est à dire recouvrant aussi bien la qualité d'exécution des ouvrages que le respect des délais et des coûts prévisionnels ou enfin la qualité des rapports entre maître d'ouvrage et entrepreneur:

En rase campagne, comme en zone urbaine, en égard aux contraintes de tracé et de l'environnement l'ouvrage d'art est un des problèmes les plus difficiles et les plus intéressants qui soient donnés à l'ingénieur routier de résoudre, car en même temps qu'il lui permet de donner libre cours à son imagination créatrice, il fait appel à plusieurs types d'investigations relevant de spécialités différentes et contribuant chacune à une étude correcte du projet.

Certes, l'ingénieur peut se trouver devant le dilemme que constitue d'une part la contrainte de dépenser un budget d'équipement à une échéance déterminée et d'autre part la perspective de devoir consacrer la quasi-totalité de son délai global à faire des études proprement dites, dès lors, la tentation est grande de réduire le programme des investigations et de lancer imprudemment le marché de travaux sur la base d'une étude sommaire, et d'un cahier des charges très général et donc laissant la porte ouverte à bien des surprises.

L'économie de temps recherchée est purement factice, car on se rend compte souvent avant même le démarrage des travaux que le projet conçu n'est pas viable et qu'il convient de reprendre les études. Il s'en suit une suspension de l'exécution du marché de travaux, et souvent une redéfinition de l'ouvrage et des conditions d'exécution.

L'autre tentation qui guette l'ingénieur peu avisé, peut surgir d'un désir de faire des économies au niveau du coût des études, ce qui se traduit par une réduction du programme d'investigations au plan géotechnique, hydrologique, voire même recherche de variantes possibles.

Mais en fait l'expérience montre que les investigations non faites se paieront toujours d'une manière ou d'une autre et à un prix bien supérieur à ce qu'elles auraient coûté si elles avaient été faites en leurs temps.

Quelles sont donc les investigations nécessaires à l'étude ?.

1)- Le choix du point de franchissement en liaison d'une part avec les contraintes du tracé et d'autre part celle du coût optimal du couple (pont, accès).

2)- L'enquête publique dont le but est de connaître les interdépendances susceptibles d'exister entre le projet d'ouvrage et d'autres équipements existants ou également projetés pour déceler les servitudes pouvant exister.

3)- Etude hydrologique et hydraulique fluviale du site pour la connaissance du P.H.E. lié à la crue de projet et pour la détermination des risques d'affouillement et des protections nécessaires.

4)- Etude Géologique et Géotechnique

5)- L'Environnement Physique pour la connaissance de l'ampleur de l'agressivité du milieu naturel ambiant (Gradient Thermique, Sismicité, Hydrométrie, précipitation, etc..)

6)- Enfin, l'impact sur le site pour assurer l'intégration de l'ouvrage dans son environnement qu'il soit urbain ou en rase campagne.

Seuls seront abordés dans la présente communication les points 2,4 et 5 ci-dessus, les problèmes d'Hydrologie et d'Hydraulique fluviale font l'objet d'un thème à part, les points 1 et 6 sont rappelés pour mémoire, mais leur importance n'est pas des moindres.

II- L'ENQUETE PUBLIQUE

L'Enquête a pour but de connaître soit l'impact que la réalisation de l'ouvrage pourrait avoir sur l'exploitation d'autres services publics, soit de s'informer de la nature des aménagements environnant projetés susceptibles d'avoir une incidence sur l'emplacement ou la définition de l'ouvrage, soit de connaître les différents réseaux susceptibles d'être logés dans le futur ouvrage, soit enfin de connaître les occupations du sol, ou les servitudes pouvant exister.

Cette enquête publique revêt une importance capitale dans le cas des ouvrages urbains, elle doit être faite à temps pour permettre une intégration de l'ouvrage dans l'ensemble des équipements programmés d'une part et éviter toute remise en cause ultérieure des études qui seraient engagées et qui seraient source de pertes de toutes sortes d'autre part.

Bien évidemment l'enquête publique doit être lancée à la phase de l'avant projet sommaire et tout au début de celle-ci.

Elle consiste à inventorier d'abord de manière systématique tous les organismes susceptibles d'être concernés directement ou indirectement par la présence de l'ouvrage, les informer ensuite des caractéristiques principales du projet, des objectifs

fonctionnels recherchés, du calendrier prévisionnel de réalisation et enfin recueillir les contraintes à prendre en compte en raison des autres ouvrages projetés ou des servitudes à respecter.

C'est en zone urbaine que l'enquête publique constitue une étape essentielle dans le déroulement de l'étude et sans elle, tout projet lancé, a toutes les chances d'être remis en cause.

En effet, dans ce cas on se trouve en règle générale en présence de réseaux divers tels que conduite, lignes électriques, câbles PTT, etc...dont l'exploitation doit être maintenue pendant la période des travaux.

Les réseaux dans la mesure où ils seront supportés par l'ouvrage et dont les dimensions peuvent être importantes auront une incidence sur le dimensionnement de l'ouvrage, voire même sur sa conception.

De même en rase campagne, l'emprise de l'ouvrage ou de ses accès pourrait empiéter sur les occupations existantes : constructions, cimentières, puits, canal d'irrigation, station de pompage, bac de franchissement d'oued, etc...

Cette mise à l'enquête doit être sanctionnée par des procès verbaux relatant les différents accords obtenus auprès de tous les services concernés.

C'est ce processus de communication qui développera une véritable synergie entre les différents services et qui est à même de garantir l'aboutissement final du projet dans des conditions satisfaisantes pour la collectivité ; il permettra également, lors de la rédaction du cahier des charges par le maître d'oeuvre, d'indiquer aux entreprises tous les sujétions découlant des existants et les dispositions arrêtées pour y faire face.

III - INVESTIGATIONS GEOTECHNIQUES

A - Préambule

Dans l'étude d'un O.A., l'étude géotechnique est d'une importance capitale du fait qu'elle permet d'orienter les responsables sur la conception de l'ouvrage d'une part, et d'autre part d'avoir une estimation des coûts des fondations, qui sont généralement élevés. Par ailleurs, il y a lieu de noter que les fondations des O.A. se caractérisent par une exécution difficile des différents appuis.

Cependant, malgré cela, on assiste à plusieurs cas où l'étude géotechnique ne fait que "figurer" dans le dossier d'Avant Projet et/ou ne se fait que tardivement lors de l'exécution de l'ouvrage. Ceci conduit évidemment à des arrêts de chantier considérables qui se chiffrent.

Notons que presque dans tous les cas, le projet de structure est fait avant toute étude de sol, ce qui donne lieu à une absence totale d'optimisation des dépenses d'une part, et à une conception d'ouvrages non adaptée au sol rencontré d'autre part.

Ci-dessus nous concrétisons ces remarques par quelques exemples réels.

CAS 1 / - Ce premier cas est relatif à l'étude géotechnique d'un ouvrage O.A. nouveau. Une première étude a été faite par le laboratoire et s'est basée sur l'exécution des sondages carottés et de pénétromètres dynamiques. Vu la profondeur importante d'affouillement, le mode de fondation conseillé, et adopté par le Bureau d'Etude, est profonde (sur pieux ou barette).

Seulement le dimensionnement de ces derniers par rapport aux efforts horizontaux nécessite la connaissance du module de réaction du sol et sa pression de fluage, qui ne peuvent être obtenus que par des essais pressiométriques. Pour cela, une commande a été adressée par le Maître d'Oeuvre au laboratoire pour l'exécution des sondages et des essais pressiométriques. Mais comme le sol de fondation est constitué d'alluvions, le laboratoire a fait savoir qu'il n'est pas équipé pour les sondages et qu'il faut passer par une entreprise spécialisée, mais qu'ils restent toujours à disposition par l'exécution d'essais pressiométriques. Or après une bonne période de silence et contre toute attente, le laboratoire a appris par l'intermédiaire de l'entreprise qui a exécuté les sondages que ceux-ci ont été effectués et que les caisses sont disponibles. Et contre toute logique c'est le laboratoire qui a contacté le Maître d'Oeuvre pour l'informer du déroulement des reconnaissances et de l'étude de l'ouvrage en question.

-Conséquence : absence d'essais pressiométriques et le module de réaction n'a été qu'évalué à partir de la littérature.

-Cause : manque total de coordination entre les divers intervenants d'une part et de curiosité du M.O. pour connaître le but de l'étude complémentaire d'autre part.

CAS 2 / - Ce cas est relatif à l'étude de fondation d'une vingtaine de ponts existants qui rentrent dans le cadre de l'élargissement de quelques routes principales ou secondaires. L'étude entamée par le laboratoire et la campagne de reconnaissance entamée par l'entreprise chargée de l'exécution des sondages ont été menées séparément sans aucune coordination. Des sondages, au nombre de 2 et de profondeur 20m ont été exécutés systématiquement par ouvrage, quelque soit la nature du sol et l'importance de l'ouvrage (longueur -RP ou RS...)

-Conséquence : rapports d'étude incomplets et sans conclusion concrète.

-Cause : manque de coordination, de données essentielles concernant des profils en long et plan d'implantation des sondages.

CAS 3 /- Ce cas relatif à un ouvrage d'art nouveau dont la conception des fondations est incompatible avec la nature du terrain rencontré. Comme celui-ci nécessite un traitement spécial, il aurait été logique de réduire les apuis au maximum et de faire une étude d'optimisation, quitte à changer la conception totale de l'ouvrage. Par ailleurs et étant donné que le sol de fondation est rocheux, et pour des conditions d'exécution, il aurait été plus logique d'adopter des pieux au lieu des barettes par exemple, ce qui a conduit à des arrêts importants du chantier.

-Conséquence : Coût de fondation élevé-délai d'exécution important conception de l'ouvrage non adaptée au site.

-Cause : Manque d'étude géotechnique sérieuse-non participation du laboratoire à la conception des fondations.

Nous nous limiterons à ces cas, bien que d'autres cas nombreux existent, pour passer à un autre volet de l'exposé, dont le rôle sera de décrire sommairement, mais de façon réaliste la gamme des moyens qui existent et des méthodes qui sont pratiquées actuellement au MAROC. Dans une certaine mesure, on confrontera cet inventaire à la panoplie internationale, sachant que l'autocensure a des limites et que la critique serait plus saine venant de l'extérieur. Enfin on recensera un certain nombre de faits et de raisons qui, peu ou non, font obstacle au déroulement efficace et harmonieux des études géotechniques.

En revanche on ne trouve pas dans cet exposé ce qui est déjà dit et écrit ailleurs, sous des signatures aussi variées que prestigieuses: l'histoire des sondages avec l'inévitable estampe représentant un tourniquet chinois, la façon rationnelle de concevoir une campagne géotechnique, des courbes et des graphiques à caractère scientifique, des corrélations entre méthodes et paramètres, le plan horriblement compliqué d'un carottier à triple paroi, l'exposé didactique des méthodes d'investigations in-situ et des essais en laboratoire. C'est l'affaire des spécialistes.

B - répartition des tâches entre le LPÉE et les entreprises de sondage

Le laboratoire Public d'Essais et d'Etude (L.P.E.E.) possède des moyens d'investigation in-situ et des moyens d'analyses, d'essais et d'études en laboratoire.

***Moyens d'investigation in-situ**

-3 sondeuses capables d'exécuter, dans les cas courants, des carottages ou des forages à la tarière.

-1 pénétrömètre statique type GOUDA, de 10 T

-5 pénétrömètres dynamique type BORRO ou SERMES

-4 pressiomètres types MENARD

-1 scissomètre

-2 équipements de petite sismique

-1 équipement de mesure de résistivité

-1 échelon mobile pour diagraphies en forage.

*Moyens d'analyses, d'essais et d'études en Laboratoire

-des ateliers d'analyses classiques d'identification, de capacité largement suffisante et facilement extensible

-50 cellules triaxiales, échantillon 38mm

-1 cellule triaxiale géante échantillon 300mm

-13 presses d'écrasement pour essais triaxiaux

-6 cellules pour essai de cisaillement rectiligne avec batis de consolidation

-4 cellules pour essai de cisaillement rotatif

-36 machines de cisaillement rectiligne

-10 presses d'écrasement pour essais en compression simple

-50 cellules oedométriques échantillon 60 et 70mm

-4 cellules oedométrique géante échantillon 300 mm

-50 batis de chargement pour essais oedométriques

-un laboratoire de chimie capable d'exécuter tous les essais chimiques sur la phase solide, liquide et gazeuse des sols

-des ingénieurs spécialisés en mécanique des sols habilités à conduire des campagnes géotechniques, à interpréter les résultats, à préconiser les modes de fondation, et à contrôler l'exécution des fondations.

Les moyens ci-dessus indiqués ne sont représentatifs que de l'activité "étude de fondation" du L.P.E. e. et n'en constituent que l'ossature principale, étant entendu que le L.P.E.E dispose d'une panoplie quasiment complète de tous les moyens matériels et intellectuels nécessaires à l'activité d'un laboratoire de géotechnique de niveau international.

De plus, le L.P.E.E. est riche d'une expérience importante et pratiquement exhaustive, sur le territoire du MAROC, qui est facilement exploitable grâce à l'information de ses archives et de sa documentation.

C'est aux entreprises, pour la plupart privées, qu'est dévolue l'exécution des sondages et des forages proprement dits, qui nécessite des matériels lourds et une logistique importante. Il s'agit donc de ce que l'on pourrait appeler la partie "travaux", ce qui n'est pas du tout péjoratif, non seulement parce que sans ces "travaux" il n'y aurait pas de géotechnique, mais parce que la qualité de ces "travaux" est déterminante pour la suite, et parce qu'une bonne intelligence et une étroite affinité intellectuelle sont nécessaires entre le L.P.E.E. et l'entreprise pour mener à bien et en commun, une campagne géotechnique.

Il existe, au MAROC, une demi- douzaine d'entreprises faisant profession de "sondeur".

La plus ancienne est installée depuis plus de cinquante ans, ce qui illustre suffisamment la longue tradition dont le MAROC peut se prévaloir dans le domaine de la géotechnique. Certaines de ces entreprises exercent leur activité, en dehors des sondages géotechniques, dans un ou plusieurs des autres domaines habituellement compris sous le nom de "travaux spéciaux", à savoir : forages d'eau, fondations profondes, injections, ancrages, traitements de sol. L'exercice de ces activités annexes est incontestablement un facteur favorable pour l'exécution de sondages géotechniques. Cela permet en effet, aux entreprises qui justifient d'une palette élargie, d'être en mesure de "voir grand" au niveau des moyens, quand le besoin s'en fait sentir, et de "voir loin" au niveau de leur collaboration, en apportant un avis autorisé sur les solutions envisageables au problème de fondation du cas étudié.

Le potentiel de ces entreprises, résultant d'une enquête récente du L.P.E.E. (cf. revue " le laboratoire dans le Génie-Civil" n°10, Janvier 1986) ressortirait à 58 appareils de sondage carotté pour l'ensemble du MAROC. En éliminant les ateliers qui sont presque exclusivement affectés au sondage minier, et en tenant compte de la surévaluation qui entache inévitablement les réponses données par les sociétés interrogées, on pourrait sans trop d'erreur ramener ce nombre à une vingtaine d'ateliers complets, avec tout leur outillage et leur environnement, avec leurs équipages de sondeurs qualifiés, réellement opérationnels au même moment. Ce nombre est déjà considérable et semble suffire actuellement au besoin.

On se souviendra de ce qui est une réalité universelle, quoiqu'un peu plus aigue dans un pays comme le MAROC ne disposant pas d'industrie locale fabricant du matériel de sondage, que pour assurer deux machines en état réel de fonctionnement il est conseillé d'en posséder au moins trois.

Les entreprises de sondage marocaines ont donc pour mission d'exécuter les sondages carottés ou les forages destructifs, de prélever les échantillons spéciaux dans ces sondages ou forages, d'exécuter les essais de perméabilité, d'équiper les forages en piézomètres, et de se charger d'autres prestations qui apparaissent nécessaires et que le L.P.E.E. ou d'autres intervenants ne peuvent assurer.

Leurs travaux sont souvent imbriqués avec les prestations 'in-situ' du L.P.E.E., lorsque ce dernier exécute, à l'intérieur des sondages ou forages, et au cours de leur exécution, des essais tels que, par exemple, les essais pressiométriques ou les essais scissométriques.

Il est à noter, enfin, que certaines entreprises de sondage installées au MAROC ont des liens de filiation avec des entreprises étrangères comptant parmi les plus notables sur le plan international. De ce fait, non seulement elles apportent régulièrement les derniers progrès en matière de géotechnique, mais elles peuvent considérablement amplifier leurs moyens matériels, humains et intellectuels lorsqu'un besoin ponctuel le justifie. Cette collaboration internationale non officielle apporte incontestablement une souplesse et un confort parfois bien utiles ainsi qu'un réel transfert de technologie.

C - répertoire de facteurs faisant obstacle au bon déroulement d'une campagne géotechnique

a) Elimination pure et simple de la reconnaissance géotechnique :

Oui, cela a été constaté, en des temps qui ne sont pas extrêmement reculés, et pour des ouvrages d'art qui ne sont pas tous insignifiants (ne parlons pas du bâtiment). Les raisons peuvent aller du simple oubli par ignorance à la recherche d'économies de temps ou d'argent mal placée. Le plus souvent le prétexte est qu'il existe quelque vague sondage dans le voisinage et qu'il n'y a pas de raison que le terrain change beaucoup à quelque distance.

Son annulation totale est évidemment un obstacle majeur au bon déroulement d'une campagne géotechnique.

b) Définition insuffisante du projet : c'est souvent le résultat de l'excès inverse, à savoir que le lancement de la campagne est tellement anticipé que celle-ci débute alors qu'on méconnaît, totalement ou partiellement, les dimensions, les charges, l'encastrement dans le sol, les tolérances de tassement, les sujétions diverses, les extensions possibles, etc... de l'ouvrage à construire.

Comme on l'a écrit plus haut, l'étude géotechnique est étroitement liée aux caractéristiques de l'ouvrage.

c) Implantation de l'ouvrage : il arrive que, pour les raisons les plus variées, l'ouvrage soit finalement construit en dehors de la zone où ont été réalisés les sondages. On se retrouve alors dans la situation évoquée au a).

d) Absence de relevé topographique du site : c'est une très grave lacune, très fréquemment constatée, qui entrave l'étude de génie civil et de tassement autant que l'étude géotechnique. Dès que le choix du site est arrêté au terme d'une démarche rationnelle, une couverture topographique à une échelle utilisable (1/100 à 1/5000 selon l'importance) devait être établie et fournie aux intervenants.

e) Implantation et nivellement des sondages, accès à ceux-ci:

Plusieurs problèmes se posent sous cette rubrique. Le plus important est le suivant : rien ne sert d'avoir réalisé d'excellents sondages si on ne connaît pas leur position exacte exprimée en coordonnées x,y,z rattachées au nivellement général, ou, à défaut, à des repères pérennes. Trop de dossiers géotechniques ne comportent qu'un vague croquis en plan sans aucune mention des niveaux. La solution passe évidemment par l'intervention d'un topographe. Les autres problèmes sont relatifs au choix de l'emplacement des sondages, qui dépend évidemment de la définition du projet de l'ouvrage (voir §b et c) et qui résulte d'un compromis entre les emplacements théoriquement souhaitables et les possibilités d'accès existant au moment de l'exécution des sondages. Si d'importants travaux sont nécessaires pour aménager des accès aux sondages, le budget de l'opération en souffrira, ou alors, à budget constant le nombre des sondages devra diminuer. Dans la plupart des cas, il faut admettre que l'implantation réelle d'un sondage puisse être raisonnablement différente de celle choisie a priori sur plan.

f) Insuffisance budgétaire : une campagne géotechnique étant précisément destinée à exploiter un domaine inconnu, il est toujours difficile d'en déterminer le coût à l'avance. Des variations doivent être prévues, sachant qu'elles seront bien plus souvent par excès que par défaut. On trouvera peu de contradicteurs en affirmant que, si une statistique universelle pouvait être établie, on s'apercevrait à coup sûr que les dépenses faites pour réparer ou camoufler les conséquences des études géotechniques insuffisantes sont infiniment plus élevées que le coût de ces études géotechniques.

g) Rigidité du contrat : dans la continuité de la remarque précédente, on relève trop souvent encore que les contrats établis pour les campagnes géotechniques, et surtout la façon dont ils sont gérés, n'autorisent pas la souplesse indispensable pour modifier - même en restant dans les limites du budget fixé - l'exécution des travaux de reconnaissance en fonction des particularités géotechniques découvertes au fur et à mesure .

h) Inadéquation du bordereau des prix : le bordereau des prix unitaires, tout au moins en ce qui concerne les travaux de sondage et de prélèvement d'échantillons doit être raisonnablement adapté aux tâches élémentaires prévues et prévisibles, de manière que des considérations financières et commerciales mettant en jeu des intérêts opposés du fournisseur et du client ne fassent pas obstacle aux impératifs technologiques et scientifiques de l'opération, qu'on doit considérer comme primordiaux. Il faut évidemment être familiarisé intimement avec des travaux de sondage pour imaginer une structure de prix adéquate, nécessaire et suffisante. Les spécialistes peuvent apporter une contribution utile à cet égard.

On peut citer quelques exemples tératologiques de ce qu'il ne faut pas faire : les déplacements entre sondages payés à la distance mesurée à vol d'oiseau (ce qui donne des résultats surprenants dans les sites très accidentés), le sondage payé en

tout et pour tout au mètre linéaire, et nec plus ultra, la campagne géotechnique, études et essais compris, payée au mètre linéaire de forage.

Il importe de ne pas tomber dans de telles monstruosités et de prévoir une rémunération logique des installations et des déplacements de machines qui soit fonction du coût réel correspondant, une décomposition de prix selon la profondeur, selon le diamètre et selon la méthode de foration, des prix pour les tubages provisoires, et une rémunération pour les attentes et les travaux divers qui interviennent nécessairement dans ce genre de prestation.

Il est certain que le déroulement harmonieux des travaux et la qualité des résultats seront mieux assurés si le client ne paye que pour ce qu'il reçoit, et si le fournisseur est payé pour ce qu'il donne. Les formules trop forfaitaires sont peu propices à la recherche méticuleuse de la qualité du résultat qui doit inspirer les intervenants dans une campagne géotechnique.

i) les délais : La plupart des contrats ignorent la spécificité des études géotechniques, et les traitent comme de vulgaires travaux de fabrication. Lorsqu'une sage-femme procède à un accouchement, il ne viendrait à personne l'idée de lui demander de se presser. La nature a certaines exigences. C'est pourtant ce qui se passe, toute proportion gardée dans l'analogue, en matière de sondages et d'études géotechniques. Les contrats sont trop souvent assortis de délais d'une brièveté ahurissante et sanctionnés, en cas de retard, par de fortes pénalités. C'est une véritable aberration quand on sait que pour obtenir un bon carottage il est impossible d'aller trop vite, et quand on sait que le programme d'une campagne géotechnique est essentiellement évolutif et qu'il ne peut être figé d'avance.

il serait beaucoup plus logique de ne faire porter les contraintes de délai que sur les durées de mobilisation et éventuellement sur les pannes imputables au fournisseur.

Quant aux gains de temps, ils peuvent être recherchés ailleurs, soit après l'intervention géotechnique.

j) Compétence des intervenants : celle-ci étant réputée totale et parfaite, le problème ne se pose en principe pas. Toutefois on conçoit que si elle venait à manquer d'un côté ou de l'autre, il y aurait là un facteur négatif. La compétence doit être présente à tous les niveaux, et en particulier sur le terrain, là où se passe une phase essentielle de l'action. On rejoint un peu l'art militaire : il ne suffit pas d'avoir de bons généraux, il faut avoir de bons officiers sous-officiers et soldats.

k) Défauts de coordination : il n'est pas nécessaire d'épiloguer sur ce sujet. On dira seulement que beaucoup de missions souffrent d'une absence de définition claire des attributions de responsabilité. Il peut en résulter des chassé-croisés et d'imbroglis financiers. Il est évident qu'un

intermédiaire investi de la responsabilité de la supervision technique d'une campagne doit également en gérer le budget et qu'il doit pour cela avoir reçu des instructions précises de la part du commanditaire. Le fournisseur de la prestation, qu'il s'agisse des travaux de sondages, ou des essais ou des études géotechniques, est en droit d'être assuré qu'il sera rémunéré des travaux exécutés selon les ordres reçus. Dans la pratique, cela exige que les responsables soient des personnes nommément désignées.

1) Méconnaissance des techniques de fondations : si la conception d'une reconnaissance géotechnique est -répétons le encore- étroitement liée à la définition de l'ouvrage à construire, elle doit aussi comprendre les fondations de cet ouvrage que, précisément, elle a pour but de déterminer. Or les fondations ne sont pas connues à l'avance, contrairement à la superstructure. Le géotechnicien doit donc, en cours de campagne, pressentir rapidement et judicieusement les systèmes de fondations qui vont se révéler nécessaires, et s'appliquer à réunir tous les renseignements utiles à leur étude complète. Faute de quoi, une fois les sondages et essais in-situ terminés, on risque de s'apercevoir que les projeteurs ne disposent pas des éléments convenables.

Prenons un exemple caricatural. On présuppose qu'un ouvrage sera fondé sur semelles superficielles. On exécute alors des sondages de 15m de profondeur qui découvrent un terrain de mauvaise qualité jusqu'à 14,50m et meilleur sur les derniers 50cm des sondages. Les essais de laboratoire confirment que le terrain superficiel est impropre à des fondations sur semelles.

Conclusion : il faut des pieux qui pourront trouver leur appui au-dessous de 14,50m.

Une telle étude est évidemment inutilisable pour le projeteur de pieux. Il fallait, en cours de sondage, décider d'approfondir ceux-ci et d'y réaliser la mesure des paramètres nécessaires au dimensionnement des pieux.

Dans des cas plus complexes, une connaissance étendue des techniques de fondation ou de traitement de terrain, ainsi que des paramètres géotechniques nécessaires à leur dimensionnement, sera fort utile afin d'aller droit au but et d'économiser les frais d'une ou plusieurs campagnes complémentaires.

m) Mauvaises conditions climatiques ou d'environnement:

les reconnaissances géotechniques sont en général exécutées dans des sites vierges et dépourvus d'accès aménagés. La neige, la pluie, les crues, ou les trop forts écarts de température sont des inconvénients importants pour leur bonne exécution, et parfois même dirimants. Il faut tenir compte des saisons.

Les conditions logistiques concernant l'approche des matériels et des matériaux, l'hébergement des opérateurs, les

liaisons téléphoniques ou télégraphiques, le ravitaillement en carburant et en nourriture, l'approvisionnement en eau potable et industrielle, etc, sont aussi des facteurs déterminants qui influent sur les coûts et sur la qualité.

Dans son propre intérêt, le commanditaire doit prendre tous ces facteurs en considération, sachant que les missions impossibles ont peu de chances de succès, même si le contrat impose toutes garanties, c'est une question de bon sens.

D -recommandations

Il est recommandé qu'une étude géotechnique préliminaire, basée sur une reconnaissance lâche, soit effectuée avant même l'appel d'offres. Celle-ci consistera surtout en la consultation des cartes géotechniques (ou géotechniques éventuellement) et des archives propres du laboratoire ou d'autres organismes compétents (ONEP...). Le but de cette étude est multiple, à savoir :

- principe probable des fondations

- niveau d'assise probable

- orienter le Maître d'Oeuvre et le Bureau d'Etudes sur le choix de la conception de l'ouvrage.

- permettre de déterminer le programme de reconnaissance pour l'étude géotechnique proprement dite (étude normale).

Cette étude fera l'objet d'un premier rapport établi par le géotechnicien dans lequel seront traités les points cités ci-dessus complétés de quelques renseignements tels que le niveau de la nappe -épaisseur approximative des différentes formations (coupe géologique du site) et leur comportement mécanique (consolidation -stratigraphie - tectonique....).

Cette étude préliminaire sera suivie par l'étude normale qui ne peut être effectuée qu'après établissement de l'Avant Projet Sommaire (APS). Les reconnaissances devront être effectuées dans l'axe du futur ouvrage et les sondages exécutés aux droits d'éventuels appuis. Ces derniers devront être localisés en coordonnées LAMBERT. Par ailleurs et pour que l'étude géotechnique soit complète, le laboratoire doit disposer de toutes les données concernant le site, et en particulier :

- données hydrologiques pour estimer la hauteur affouillable

- les profils en long de l'oued dans l'axe de l'ouvrage

Cette étude permet donc de prédimensionner les fondations tout en déterminant les moyens d'exécution. Les méthodes de calcul par différentes méthodes sont résumées dans le fascicule FOA83 établi par le laboratoire.

Cette étude fera l'objet d'un deuxième rapport établi par le géotechnicien et qui devra comporter :

-description des reconnaissances (nombre de sondages-profondeur ...)

-coupe du terrain avec implantation des sondages exécutés reliés au NGM.

-niveau de la nappe

-résultats des essais in-situ et de laboratoire.

-interprétation des essais en vue du dimensionnement :

*force portante

*calcul des tassements

-proposition des modes fondations à adopter

-problème d'exécution (venue d'eau - terrain rocheux- battage des pieux - exécution de pieux ou barrettes..)

Enfin le géotechnicien devrait être au courant du mode de fondation adopté : mode - dimensions - ancrage et calcul, afin de donner son avis sur les fondations adoptées et sur les calculs (IL faut noter que l'utilisation brute des résultats des essais de laboratoire peut conduire à l'erreur). Par ailleurs, suite à ces vérifications et compte tenu des phénomènes mis en jeu, le géotechnicien peut juger s'il est nécessaire ou non d'effectuer des reconnaissances approfondies (approfondissement des sondages - essais de laboratoire complémentaires...). Il est bien évident que la conception définitive de l'ouvrage et en particulier des fondations est définie par le maître d'Oeuvre.

Lors de l'exécution des travaux de fondation, le géotechnicien devrait être appelé à les contrôler, afin de pouvoir confirmer la compatibilité de la nature du sol rencontré avec celle décrite dans le rapport d'une part et de donner des recommandations in-situ pour minimiser le remaniement du sol d'autre part.

En conclusion, une étude géotechnique d'un O.A.sérieuse ne peut être effectuée sans une bonne coordination des divers intervenants. A ce propos notons qu'il est très souhaitable que le géotechnicien soit associé à l'étude des fondations depuis le début jusqu'à leur exécution. Il devrait en principe superviser tous les travaux de reconnaissances et l'exécution des fondations bien que celles-ci soient prises en charge par l'Administration.

IV - ENVIRONNEMENT NATUREL DE L'OUVRAGE

A - agressivité du site

Un ouvrage d'art est implanté dans une ambiance caractérisée par la nature du sol, la nature de l'eau qui la baigne, la composition de l'atmosphère, la température de l'air, les précipitations, l'ensoleillement. Ces différents facteurs vont agir sur l'ouvrage plus ou moins intensivement selon leur caractère.

Sans considérer les actions à caractère brutal ou accidentel (telles que crues, tornades, accidents de circulation, surcharges excessives, incendie, etc..) la durabilité et le niveau de service de l'ouvrage seront conditionnés par ces caractéristiques.

Dans ce qui suit, nous allons analyser ces différents facteurs de dégradation et les investigations à mener pour en déterminer l'importance.

a - Agressivité du sol

L'agressivité du sol est essentiellement à caractère chimique et demande pour devenir active la présence d'eau. Les principaux éléments agressifs qu'on peut rencontrer dans le sol sont les sulfates, les chlorures, les sels de magnésie et les acides organiques.

L'action des chlorures s'exerce au niveau des armatures du béton, l'action des autres éléments agressifs s'exerce au niveau du ciment durci du béton.

En vue d'évaluer l'agressivité du sol, il y a lieu de déterminer :

- Teneur en chlorures

- Teneur en sulfates. Si l'examen du prélèvement montre que les sulfates se trouvent sous la forme de veines ou de gros cristaux, il faut faire un échantillonnage sur une zone plus étendue ;

- PH

- Teneur en matières organiques

- Porosité

- Etat de saturation en eau. Cette donnée n'a de valeur que si elle est étendue le long des saisons d'une année.

Une autre détermination à effectuer sur les ouvrages enterrés linéaires est :

- La détermination de la résistivité électrique du sol in-situ.

Il est évident que, la nature du sol pouvant changer avec la profondeur, ces déterminations doivent se faire sur des prélèvements effectués sur la profondeur totale de la fondation ou sur chacune des couches différentes si celles-ci sont connues.

b - Agressivité de l'eau libre

Les caractères chimiques d'agressivité de l'eau sont les

mêmes que le sol. Seule la morphologie des conditions de l'attaque est différente.

La mobilité et la possibilité de renouvellement des ions agressifs au niveau des parements des éléments constructifs immergés est beaucoup plus importante que dans le cas des sols ; l'intensité de l'attaque pour une même concentration des solutions agressives sera de même plus importante.

En cas d'absence de pluie ou de vent qui active le contact entre les agents agressifs et les éléments de l'ouvrage, l'agressivité de l'atmosphère est faible.

La hauteur moyenne des précipitations annuelles est déjà un bon indicatif de l'agressivité par l'eau de pluie du site ou de la région du site. Une indication plus précise peut cependant être obtenue si l'on dispose du spectre annuel de précipitations journalières qui pourrait être exprimé en mm/h par exemple : en effet, l'agressivité d'une pluie continue est bien plus importante, du point de vue de la lessivation et de la neutralisation de l'alcalinité du béton, que celle provoquée par des précipitations torrentielles mais de courte durée.

L'agression provoquée par l'anhydride carbonique dissout dans l'eau de pluie peut être légèrement différente d'une région à une autre et selon le type de précipitation ; pluie fine lente (forte concentration de gaz carbonique dissous) ou averse rapide en grosses gouttes (faibles concentration en gaz carbonique). Ces différences sont cependant relativement faibles et de ce fait ne méritent pas une détermination spéciale.

Par contre, les gaz agressifs industriels et les embruns salins d'origine marine peuvent conditionner des taux d'agression complètement différents de l'eau de pluie selon le site de l'ouvrage, et la détermination de leur concentration dans l'eau de pluie devient intéressante. Cette détermination peut se faire à l'aide d'un pluviomètre cumulatif (conservant l'eau de pluie de longues périodes) ; l'eau récupérée est analysée par la suite.

L'agressivité de l'atmosphère elle-même, en absence de pluie, peut être déterminée par des prélèvements et analyses de l'air atmosphérique. La faible concentration de ces agents dans l'air rend cependant ces analyses très pointues, raison pour laquelle on se contente le plus souvent de procéder à l'analyse des dépôts atmosphériques provoqués par la rosée ou par le vent (ce qui par ailleurs peut être plus directement lié à ce type d'agressivité). Ceci peut se faire à l'aide de capteurs de dépôt constitués essentiellement d'un plan d'eau distillée, à la surface bien déterminée et au trop plein relié à accumulateur.

Par ailleurs, il est intéressant de noter un cas souvent rencontré et qui peut être considéré comme un cas d'agressivité atmosphérique : celui des vents de sable. Si l'effet sur le béton reste superficiel et consiste en une érosion fine, par contre pour les équipements métalliques (ou l'ouvrage lui-même s'il est en acier) l'effet devient plus important et peut

consister en un éclatement entier de la peinture et peut mener à la corrosion de ces éléments de l'ouvrage.

La prévision de l'érosion provoquée par des vents de sable peut être évaluée à partir des relevés de fréquence des vents de sable effectués par certaines stations météorologiques. L'existence d'extensions de sable à proximité du site et le relevé de vents forts dans la direction appropriée peut par ailleurs constituer une indication suffisante.

c - Agression thermique

La température présente deux aspects pouvant collaborer à la dégradation des ouvrages :

-le premier découle du fait que l'activité de la grande majorité des réactions chimiques, dont celles provoquées par les agents agressifs, augmente avec la température.

-le deuxième aspect est celui qui a trait à la déformation thermique. Une variation importante de la température conduit à une dilation et une compression maximale au matériau, et peut donner lieu à des fissurations.

Le relevé dans une station météorologique proche du site de l'ouvrage de la température moyenne annuelle est déjà un indicatif du zoning d'agressivité du site.

Une indication plus complète peut être tirée de la considération des températures et degrés hygrométriques journaliers (généralement relevés dans ces stations à trois heures différentes de la journée) : une exploitation par ordinateur, à l'aide d'un programme simple, d'une banque de données climatologiques informatisée peut nous donner la fréquence annuelle des moments de rosée et ce résultat est bien plus transcendant que le simple relevé des températures.

La mesure de l'ensoleillement s'effectue dans les stations météorologiques par détermination de l'énergie de rayonnement global et de la durée de l'ensoleillement ; ces résultats sont directement liés à la température maximale atteinte par les matériaux exposés au soleil (fonction également de l'aspect de leur surface : couleur et coefficient spéculaire). Il serait fort intéressant de relier ces facteurs à la température maximale atteinte par différents éléments de la construction ce qui peut constituer un sujet de recherche, particulièrement au MAROC.

B - Problème d'érosion

Du fait que le MAROC se caractérise par un climat semi-aride et par des terrains instables, surtout au Nord, le phénomène d'érosion est très important. Néanmoins, les responsables et les projecteurs des ouvrages d'art négligent ce phénomène, jugeant qu'il est de faible importance par rapport à l'ouvrage proprement dit.

Or dès les premières précipitations, les érosions donnent lieu à des dégâts importants remettant parfois sinon dans tous les cas, en cause la stabilité de l'ouvrage. Des solutions de confortement deviennent donc urgentes et nécessitent des coûts élevés, plus importants que ceux qu'auraient nécessité les protections. Il faut bien noter que les protections anti-érosion sont en général simples et consistent en l'exécution d'un système de drainage adéquat.

Toutefois il faut bien signaler qu'il n'existe pas de solution unique, et que pour chaque site la solution dépend en grande partie de la nature de matériau rencontré, des données climatologiques et de la topographie. De ce fait il est conseillé de faire appel à un géotechnicien spécialiste, dès que le problème d'érosion est mis en évidence.

Avant d'aborder les différents phénomènes d'érosions il faut retenir que les sols érodables possèdent au moins l'une des trois caractéristiques suivantes :

- sol fin pulvérulent (à cohésion très faible)
- sol gonflant
- sol à structure hétérogène.

a - Solifluxion

La solifluxion est un cas particulier du fluage et elle est due aux variations volumiques du sol. En effet un échantillon d'argile très plastique placé sur une pente , après plusieurs cycles du dessiccation imbibition, progresse doucement vers le bas. Ce phénomène est illustré dans la nature par des réptations et se repère par la présence d'ondulations du sol et l'inclinaison des arbres et de poteaux télégraphiques.

Ce phénomène bien que superficiel conduit à une perte des caractéristiques mécaniques (cercle de Mohr pratiquement inexistant) et par conséquent à une coulée boueuse qui peut s'étendre sur des longueurs importantes.

Ce phénomène n'intéresse pas directement les ouvrages d'art mais les ouvrages avoisinants (berges des oueds -talus en déblai).

b - Ravinements (sol très fin - sol "sabliformes")

On distingue trois phénomènes d'érosion (par ordre d'importance) :

- érosion en nappe
- érosion en rigoles
- érosion en ravines

Rappelons que l'érosion, en général, correspond à un transport des matériaux par les eaux de ruissellement. Celle-ci se déclenche lorsque la force créée par l'eau en écoulement atteint un certain seuil, appelée force d'entraînement. L'importance de l'érosion se détermine par les données suivantes :

- données pluviométriques
- coefficient de ruissellement
- données géométriques (pente)
- résistance à l'érosion

Il faut noter que si la résistance à l'érosion est essentiellement fonction de la granulométrie pour les sols dits "sabliformes", ces derniers se caractérisent par une structure en caillots, de quelque centimètres de diamètre. Ils se comportent comme des sables moyens de 1 à 2mm de diamètre mais de densité très faible, de l'ordre de 1,6 au lieu de 2,7 . De ce fait, ils sont plus érodables que des sables de même diamètre.

Lorsque l'érosion est à ses débuts, les écoulements d'eaux et les transports de matériaux ne prennent pas de chemins privilégiés et on assiste à une érosion en nappe.

Par contre après plusieurs précipitations, des rigoles commencent à apparaître et on assiste à une érosion en rigoles.

De même lorsque les rigoles deviennent importantes elles aboutissent à des ravines. Ces dernières se trouvent plus importantes dans les régions où les précipitations se manifestent sous forme d'averses violentes et brèves.

Ce phénomène intéresse surtout les remblais d'accès aux ponts et peut donner des désordres dans la dalle de transition.

c - Glissements

Ce sont des phénomènes qui intéressent aussi bien les remblais d'accès que les ouvrages proprement dit, du fait que la stabilité des culées (superficielle ou profonde) est directement liée au coefficient de sécurité des talus au glissement.

Ce sont des phénomènes connus et les plus simples, sont les glissements plans et les glissements rotationnels. Les glissements plans affectent :

- Les talus de remblai (sol pluvéruent) à pente trop raide
- Les talus de déblai qui contiennent des couches ou des passages de caractéristiques médiocres.
- Les talus qui connaissent des fluctuations importantes de la nappe.

-Les talus qui voient leur butée en poids s'annuler. Ceci peut être dû soit à des travaux de terrassements, soit à une érosion de pieds, tels que sapement des berges..

Quant aux glissements rotationnels, ils sont plus complexes et peuvent affecter aussi bien les remblais que les déblais. Pour les premiers ils sont profonds et intéressent les remblais sur sol mou ; le cercle de glissement est en principe tangent au substratum rencontré en profondeur.

Pour les seconds ils peuvent être soit superficiels soit progressifs, de l'aval vers l'amont.

d - Sapement des berges

Ce cas intéresse surtout les ouvrages situés au coude des Oueds, où l'une des berges est exposée à l'écoulement. Le phénomène consiste donc en une érosion progressive de la berge concernée, qui à long terme, conduit à des désordres dans les culées.

e - Affouillement

Ce phénomène intéresse surtout les piles de l'ouvrage et aussi les culées si leur emplacement se situe dans le lit de l'Oued.

A l'inverse des autres phénomènes cités ci-dessous, l'affouillement peut donner lieu à des désordres brutaux et néfastes, sans préavis. Son importance est fonction surtout de la nature du sol de fondation, de l'hydrologie de l'Oued et de ses dimensions.

Par ailleurs, il faut bien que l'affouillement intervienne en bonne partie dans la conception de l'ouvrage. En effet lorsque celui-ci est important, on s'oriente généralement vers une structure admettant le minimum d'appuis intermédiaires.

f - Karstification

Ce phénomène est dû à une érosion du sol par les eaux souterraines, et où l'érosion chimique domine largement l'érosion mécanique.

Il intéresse surtout les terrains solubles tels que les calcaires. Le carbonate de calcium Ca CO_3 qui constitue l'essentiel de la roche se transforme au contact d'eaux chargées en CO_2 , en bicarbonate soluble, et donne lieu par conséquent à la création de vides dans la formation. De même dans les formations renfermant des passages de gypse ou de sel, on assiste à des formations de cavités dans le sol, suite à la dissolution de ces passages en contact de l'eau pure

La circulation continue des eaux souterraines conduit à un approfondissement et un élargissements des cavités et par conséquent elle favorise le phénomène de karstification . Lorsque celui-ci devient important, il peut mettre en péril la stabilité des fondations de l'ouvrage d'art.

C - recommandations

Les actions agressives qui peuvent s'exercer sur un ouvrage en fonction des caractéristiques sont très souvent, pour ne pas dire toujours, négligées. Ceci conduit à une sérieuse diminution du niveau de service et de l'espérance de vie de l'ouvrage.

Une étude préalable des caractéristiques ambiantes du site (physiques, chimiques, météorologiques) dont les résultats seraient pris en considération dans l'élaboration du projet et dans la rédaction des clauses techniques du cahier de charges, permettrait d'éviter des réparations ou confortements ennuyeux et coûteux et d'assurer la durabilité de l'ouvrage tout en garantissant le niveau de service pour lequel il a été prévu.

Pour évaluer l'agressivité du sol, il est conseillé de déterminer la teneur en chlorures, la teneur en sulfates, le PH, la teneur en matières organiques, la porosité et l'état de saturation en eau.

Une autre détermination à effectuer sur les ouvrages enterrés linéaires est la détermination de la résistivité électrique du sol-in-situ.

Quant à l'évaluation de l'agressivité de l'eau, on la détermine par son analyse chimique minérale avec détermination notamment des bicarbonates, carbonates, sulfates, chlorures, calcium, magnésium, alcalis, matières organiques et salinité globale. La détermination de l'agressivité calco-carbonique doit se faire aussitôt après prélèvement par détermination de l'anhydrite carbonique dissous et du PH, cette agressivité peut se déterminer soit par calcul, soit par l'essai dit au marbre.

La composition d'une eau libre,exceptée celle de mer,peut changer considérablement en fonction des saisons,ce qui veut dire que la détermination précise de l'agressivité de l'eau d'un site demandera des prélèvements à différentes périodes de l'année.

L'action érosive de l'eau doit être évaluée en fonction de la vitesse et l'entraînement des solides lors du grossissement de oueds en hiver et au printemps.

Pour évaluer l'importance de l'érosion,il importe d'avoir toutes les données nécessaires concernant l'hydrologie et la nature de matériaux constituant les remblais d'accès,les talus en déblai ou les berges.Ceci permettra de déterminer la résistance à l'érosion de ces matériaux et par conséquent les solutions de protections adéquates à adopter en fonction de la topographie du site.

Toutefois une étude géotechnique préliminaire se basant sur de simple visites de sites peut être d'une grande utilité en permettant de déterminer :

- l'importance des ravinements et des rigoles
- l'état des berges et leur stabilité
- l'importance des galets tapissant le lit de l'Oued

-le repérage d'ondulation et l'inclinaison des arbres et des poteaux télégraphiques.

Par ailleurs, l'importance des affouillements peut être déterminée par des essais in-situ, tels que les essais pénétrométriques qui permettant d'avoir la hauteur maximale d'affouillement atteinte.

L'étude géologique du cracé routier permet en général de déterminer si le site de l'ouvrage d'art peut karstifié ou non dans le cas affirmatif, il y a lieu d'effectuer des sondages destructifs avec enregistrement de paramètres de perforation afin d'évaluer l'importance des vides.Lorsque ceux-ci sont très importants il est recommandé de s'orienter vers une conception admettant le minimum et par conséquent le minimum d'appuis de traitement du sol.

A N N E X E A

METHODES ACTUELLEMENT PRATIQUEES AU MAROC PAR LES ENTREPRISES DE SONDAGE, ET MOYENS CORRESPONDANTS

Le MAROC est un pays plus vaste que la plupart des pays d'EUROPE et qui présente une diversité géologique qui n'a rien à leur envier, si toutefois on peut envisager une quelconque compétition internationale dans ce domaine.

Ce n'est donc pas de la monotonie des faciès que pourrait se plaindre - ou se féliciter - le géotechnicien marocain. Les spécificités locales sont essentiellement représentées, dans certaines régions, par les sols gonflants et par les sols à secs à structure fragile s'effondrant en présence d'eau. D'une manière générale, on trouve donc de tout. Aussi ne faut-il pas s'étonner d'être en présence d'une gamme de méthodes et d'un parc de moyens d'un parfait classicisme.

Un commentaire préalable s'impose sur la modernité du parc de matériel. D'une manière générale, les matériels de travaux publics, et les matériels de sondage qui en font partie, sont des matériels de conception simple assurant quelques fonctions simples. Aussi les progrès technologiques dans ce domaine n'ont-ils pas montré des bouleversements spectaculaires depuis longtemps, et les bases fondamentales restent-elles souvent les mêmes et ne sont-elles appelées à aucune évolution prévisible.

Un appareil de sondage comporte trois fonctions : rotation, poussée vers le bas, relevage vers le haut.

Il faut lui associer un environnement constitué essentiellement par une ou plusieurs pompes à eau et à boue, une ligne de forage comportant des tiges, des câbles et des tubages de revêtement, divers outils de forage, de carottage et de prélèvements d'échantillon, et divers accessoires adaptés aux essais et aux observations à faire dans le trou.

Certains composants de cette mécanique s'usent rapidement et sont régulièrement changés. D'autres sont quasiment éternels. L'ensemble se caractérise plus par la simplicité et la robustesse, que par une recherche de sophistication. L'usage impose sa loi sans appel : seuls survivent les bons modèles.

Il serait particulièrement absurde de juger de la qualité d'un parc de matériel de sondage en ne prenant en compte que la date de fabrication ou de mise en service des machines.

D'autre part, de même que la meilleure des automobiles sera directement conduite au fossé par un conducteur inexpérimenté, la meilleure des sondeuses crèvera lamentablement aux mains d'un sondeur qui ne sait pas sonder.

Ceci étant, le parc des sondeuses proprement dites actuellement opérationnelles au MAROC comporte des machines qui affichent une date de mise en service respectable, aussi bien que quelques machines tout à fait récentes.

Passons en revue les différentes méthodes pratiquées.

Les sondages manuels sont cités ici pour mémoire, afin qu'il ne soient pas oubliés, bien qu'ils ne demandent pas de moyens très élaborés, et ne ressortissent donc pas à la compétence normale des entreprises spécialisées. Ce sont toutefois des alliés précieux du géotechnicien et ils permettent dans certains cas, à moindre frais, de voir d'un peu plus près ce qui se passe sous la surface du sol. Il s'agit de puits, de tranchées et de galeries. Ces sondages sont appelés "manuels" parce qu'ils utilisent essentiellement l'énergie humaine, avec quelques outils rustiques tels que pelle, pioche, brouette, et treuil. Seule la pénétration dans le rocher nécessite de recourir au marteau à air comprimé ou à l'explosif.

Ce type de sondage, outre son coût souvent modique, présente le très grand avantage d'être accessible à un observateur. On peut entrer physiquement dans un puits ou une galerie, alors qu'on ne peut pas entrer dans un forage de 10cm de diamètre. On peut y prélever des échantillons peu remaniés, et parfaitement définis en orientation.

Mais il ya le revers de la médaille, et il est d'importance. Ces sondages sont très lents; et ils sont vite limités en extension par la présence d'eau et par les éboulements. Dès que des soutènements et des épuisements sont nécessaires, la sécurité des ouvriers est en péril sauf à recourir à des moyens puissants qui ne sont pas à la portée des tâcherons habituellement employés à ces travaux et qui, de toutes façons, rendraient le prix beaucoup moins intéressant.

Dans la grande majorité des cas, les sondages manuels ne sont utilisés qu'en phase préliminaire, ou à titre de complément.

Les sondages carottés, à l'eau claire ou à la boue bentonitique, sont la base des reconnaissances de quelque importance.

Ils peuvent être verticaux ou inclinés, la plupart des sondeuses carottières autorisant de travailler dans n'importe quelle direction, y compris les directions remontantes comme cela peut se pratiquer à partir d'une galerie.

Le diamètre du sondage, qui s'exprime classiquement par le diamètre du trou, varie entre 75 et 150mm environ, la dimension la plus courante étant de 100 mm. Selon les carottiers utilisés, dont l'épaisseur varie en fonction du type et de la fabrication, le diamètre de la carotte est inférieur de 15 à 30 mm environ à celui du trou.

Il est très difficile de fixer les performances d'un appareil de forage.

Seuls les constructeurs, si l'on en croit leurs catalogues, semblent avoir des idées précises sur la question, que ne partagent pas toujours les utilisateurs (soit qu'ils les dépassent, soit qu'ils ne les atteignent pas). En fait, les performances dépendent grandement du terrain et de l'adresse de l'opérateur.

La limite absolue qui découle de la conception est cependant simple et facile à comprendre: c'est la force de levage, que le poids du train de sonde ne saurait dépasser, faute de quoi on ne pourrait plus le retirer du trou,

La majorité des sondeuses carottières opérant actuellement au MAROC est constituée de machines à boîtes de vitesses mécaniques, à poussée par verins hydrauliques, à relevage par treuil mécanique, animées par un moteur de 20 à 30 ch. En équipement de base, le moteur est thermique. Il peut lui être substitué un moteur électrique pour les travaux en milieu confiné. Ce sont des machines à mandrin, c'est à dire qu'elles entraînent les trains de tiges en rotation et translation par une tête équipée d'un mandrin que l'on bloque et débloque manuellement chaque fois que la course des verins d'avance est épuisée et doit être rattrapée.

Ces machines sont parfaitement à l'aise, dans les diamètres usuels, jusqu'à des profondeurs d'environ 50 m. Elles peuvent atteindre, avec du doigté, 100 m et plus. Leur limite absolue est de 300 m en très petit diamètre et avec des tiges légères.

On peut dire qu'un sondage carotté classique pour reconnaissance de fondation d'ouvrage d'art se caractérise par un diamètre d'environ 100 mm et une profondeur de 20 à 50 m. Il est en général vertical.

Le but du sondage carotté est de prélever, en continu, des carottes, de manière à établir la coupe complète et précise des terrains traversés. En plus de ce que l'on appelle ainsi le "carottage continu", on procède en général à des "prélèvements intacts" au moyen d'appareils échantillonneurs spéciaux qui permettent, comme leur nom l'indique, d'échantillonner avec le minimum de remaniement.

Ces échantillonneurs comportent une gaine qui enveloppe l'échantillon pendant son prélèvement au fond du sondage et qui le préserve jusqu'à son exploitation au laboratoire.

les carottiers utilisés sont quelques fois des carottiers à simple paroi, pour les avant-trous ou dans le rocher compact et peu fissuré. Le plus souvent on utilise des carottiers à double-paroi, dont la paroi intérieure, au contact de la carotte, ne trône pas et évite donc de désagréger celle-ci par action mécanique, et où l'eau circule entre les deux enveloppes et n'érode donc pas la carotte en cours d'extraction.

Le choix des couronnes d'usure, qui découpent la carotte, relève de l'art et de l'expérience du sondeur. Les couronnes sont souvent, mais pas forcément, garnies de diamants

Il y a quelques années, on trouvait encore, au MAROC, des spécialistes du carottage à la grenaille, survivance locale d'une technique ancienne tombée depuis longtemps en désuétude en raison de la commodité apportée - mais à quel prix - par les couronnes diamantées modernes. Cette technique de la grenaille, économique, donnait un carottage d'excellente qualité mais exigeait une virtuosité exceptionnelle, malheureusement perdue.

Il n'est pas nécessaire, en revanche, de posséder un tour de main hors du commun pour carotter un bon terrain cohérent, compact, étanche, non fissuré et pas trop dur. Malheureusement, la nature n'est pas faite que de ce matériau idéal. La difficulté inhérente au sondage (comme à tous les forages en général) est l'éboulement du trou. Si le terrain est suffisamment imperméable, on peut tenter de la pallier en utilisant une boue bentonitique comme fluide de forage, avec l'avantage corollaire (qui n'est souvent pas perçu comme tel par les non spécialistes) de diminuer la tendance à la désagrégation de la carotte. Mais dans la plupart des cas, il s'avère nécessaire de poser des tubages provisoires de revêtement pour coffrer la paroi du forage. Ces tubages de revêtement, qui encaissent le frottement latéral du sol sur toute leur hauteur en contact avec celui-ci, ne peuvent être enfoncés indéfiniment. Il faut donc procéder à des "télescopages", c'est à dire introduire dans un tubage déjà en place et enfoncé au maximum, un tubage de plus petit diamètre qui lui aussi sera enfoncé au maximum sous le pied du précédent, et ainsi de suite. Il en découle que les carottiers utilisés doivent avoir, eux aussi, des diamètres de plus en plus petits pour pouvoir toujours passer à l'intérieur des tubages de revêtement.

Garantir un diamètre de carottage en fond de trou relève donc de la gageure, puisque cela revient à prédire le résultat du sondage avant de l'avoir commencé, de manière à calculer le nombre d'accidents, de blocs et de passages éboulants, qui entraîneront autant de telescopages de tubages et autant de réductions de diamètre de carottage. Cette évidence parfaitement accessible, même au profane, n'empêche pas certains maîtres d'oeuvre, de faire du diamètre terminal une clause sacro-sainte de leurs cahiers des charges.

La raison de ce déni d'évidence découle cependant d'un bon sentiment. En effet le carottage est d'autant meilleur que le diamètre de la carotte est grand, ce qui est parfaitement sensible quand le terrain est "faible" (terrains meubles, sensibles à l'eau, rocher très fracturé), mais qui devient totalement insensible dans le cas contraire.

Par la force des choses, de nombreux ouvrages d'art sont des ponts et franchissent des rivières. Les sondages doivent donc traverser une épaisseur souvent importante d'alluvions composées de sable, galets et blocs. Ce sont bien là des formations qui posent le plus grand nombre de difficultés au sondeur.

Enfin, il ne faut jamais oublier qu'une machine de sondage

pèse de l'ordre de 2 Tonnes, qu'elle est équipée d'un mât de 4m, et qu'elle a besoin d'eau à raison de 100 litres/minute pour fonctionner. Les questions d'accessibilité et d'approvisionnement en eau sont donc toujours préoccupantes et doivent être prises en considération de premier rang lors de la conception d'une campagne de reconnaissance et de l'évaluation de son prix.

Le sondage à percussion ou au battage est une technique utilisée dans les alluvions ou dans les blocs, quand le carottage est inopérant parce que le matériau ne reste pas à l'intérieur du carottier lorsqu'on procède à la manoeuvre de relevage pour en récupérer le contenu. La méthode s'apparente au havage. Elle consiste à désagréger le sol avec un trépan et à remonter les sédiments ainsi obtenus avec une soupape (tube à sa base d'un clapet se fermant à la remontée). Un ou plusieurs tubages de revêtement sont descendus au fur et à mesure de l'exécution de trou. La méthode n'est praticable qu'en sondage vertical. Dans les sols meubles fins tels que sables ou petits galets, on s'abstient de la désagrégation préalable au trépan et on utilise directement la soupape.

Ce type de sondage est praticable, avec une sondeuse carottière classique équipée d'un treuil, sur quelques mètres en début de sondage, dans un diamètre permettant la poursuite du sondage au carottier une fois atteintes les formations carottables.

Lorsque l'on prévoit que le terrain contient de très gros blocs (diamètre de plusieurs décimètres) et sur une assez grande profondeur, et que l'on désire recueillir certains de ces blocs à l'état intact, on peut procéder à un forage au battage en gros diamètre (500mm par exemple). Il faut alors utiliser un atelier spécial, au type de ceux qui sont prévus pour les forages d'eau. Le parc marocain comporte une douzaine d'ateliers de battage, allant de simples treuils archaïques à trépied en bois et à cabestan manuel, aux machines élaborées de battage rapide, dont l'amplitude et la fréquence du battage sont réglées mécaniquement.

Il est bien clair que cette méthode ne permet de recueillir que des échantillons partiels et totalement. La stratigraphie "en petit" est entièrement escamotée, les gros blocs sont cassés, la partie fine est lavée et échappe à la soupape. Ni la granulométrie ni la densité ne peuvent être appréhendées. Mais il n'y a, dans certains cas, guère moyen de faire mieux.

Les prélèvements intacts sont pratiqués, de façon séquentielle, à l'intérieur des sondages carottés ou de quelconques forages, au sein des couches caractéristiques. Le principe consiste à équiper la paroi intérieure d'un carottier spécial d'une gaine en métal ou en matière plastique, de telle sorte que la carotte découpée par le carottier se loge dans cette gaine au fur et à mesure de la pénétration du carottier. Une fois le carottier remonté à l'air libre, la carotte est extraite, enveloppée dans sa gaine cylindrique dont les deux extrémités

sont alors bouchées et scellées. L'échantillon ainsi protégé n'est ouvert qu'au laboratoire où il est réputé avoir conservé sa structure, sa densité et sa teneur en eau initiales.

Les prélèvements intacts ne se pratiquent qu'en terrains meubles de granulométrie fine, ou en semi-roches très tendres (marnes, argiles, argilites).

Les procédés pratiqués au MAROC sont de deux types. Le premier consiste à battre au mouton un appareil à paroi mince dénommé APM dont le diamètre courant est de 78 mm. On relève à cette occasion la courbe d'enfoncement en fonction de l'énergie de battage, qui constitue un élément représentatif de la consistance et de la raideur de la formation. Le deuxième utilise un carottier à triple paroi, qui est en fait un carottier double augmenté de la gaine intérieure, travaillant en rotation. La gaine peut être dépassante, en terrain très meuble et peu résistant, de manière que le fluide de forage n'entre pas, ou peu en contact avec la carotte. Ce type de carottier est connu sous le nom de MAZIER, qui est celui de son inventeur.

Il existe quantité d'autres appareils pour prélèvements intacts, ou réputés tels. Certains n'existent que sur plans. D'autres sont des chef d'oeuvres de mécanique de précision peu compatibles avec la rudesse des conditions d'utilisation en chantier et les budgets habituellement dévolus aux sondages. Chacun de ces appareils doit compter d'ardents et enthousiastes défenseurs, à commencer par leurs inventeurs et leurs fabricants.

Il importe toutefois de considérer avec réalisme ce qui existe localement et ce qui se pratique couramment avec des résultats fiables et satisfaisants, et d'admettre avec sagesse qu'une certaine sélection par l'usage a pu être faite par les pratiquants expérimentés.

L'essai S P T, qui veut dire Standart Penetration Test, se pratique couramment dans les terrains sableux à l'occasion des sondages. C'est un essai technologique de pénétration par battage qui doit donc être exécuté en respectant rigoureusement les normes et la procédure fixées, faute de quoi il est inexploitable. Cet essai est à la base de méthodes de calcul de force portante dans les sables, et d'évaluation de la sensibilité à la liquéfaction d'origine sismique, d'audience universelle. C'est un essai "in-situ" très utile pour apprécier les caractéristiques réelles en place des sables, qui sont des matériaux difficiles à prélever sans remaniement.

Le carottage par vibropercussion est pratiqué en France à l'échelle industrielle depuis le début des années soixante dix. Il a notamment fait florès lors des reconnaissances des sites de centrales nucléaires fluviales fondées sur alluvions, puis s'est étendu aux ouvrages hydrauliques en alluvions et enfin, d'une manière générale, à tous les sondages en terrains meubles où les techniques traditionnelles ne procurent qu'un échantillonnage bien imparfait.

la méthode procède par fonçage d'un tube échantillonneur dans le terrain au moyen d'un appareil de battage. Le tube est garni d'un sabot et d'un extracteur en pied. Il comporte une gaine intérieure en matière plastique destinée à recueillir le terrain et à le préserver jusqu'au moment de l'exploitation en laboratoire. Le tube ne tourne pas. Il poinçonne le terrain sous le seul effet de la vibration verticale. Aucune injection de fluide de forage n'est nécessaire, il n'y a donc ni délavement des fines, ni imbibition des couches non saturées. L'épaisseur de la paroi de l'échantillonneur est faible par rapport au diamètre, et de ce fait le remaniement de l'échantillon se traduit seulement par une légère compression centripète qui, dans la majorité des cas, n'affecte d'ailleurs que la périphérie et non le cœur. Les forages doivent être entièrement tubés, le tubage de revêtement rejoignant le pied de l'échantillonneur au terme de chaque passe. Les performances du procédé sont essentiellement limitées par cette sujétion de tubage.

Au niveau des performances, on peut dire que les diamètres sont au moins équivalents à ceux pratiqués en sondages carottés et que des profondeurs de 30 à 50m sont normalement accessibles, dépendant des sujétions de tubage.

Le résultat de ces sondages se présente sous la forme d'un carottage continu présenté en échantillons sous gaine en matière plastique de longueur unitaire 1m, scellée aux deux extrémités. La stragrapie est intégralement restituée, et ceci d'une manière étonnante, permettant, par exemple d'observer des lits de sable fin ou de limon de 5mm d'épaisseur. La granulométrie est absolument intacte, à cette réserve près que des galets présentés sous le tranchant du sabot ont pu être cassés. La teneur en eau est évidemment celle en place pour les terrains non saturés. Quant à la densité, il est couramment admis qu'elle est valablement représentative de l'état en place.

Le procédé a évidemment des limites d'application. Le sondage ne peut être que vertical descendant. La profondeur est limitée par la nécessité de tuber entièrement le forage. Les blocs trop gros qui ne peuvent être cassés par le sabot de l'échantillonneur doivent être pluvérisés au trépan et entraînent un télescopage de tubage, amenuisant ainsi les performances en profondeur. Du fait de la méthode par poinçonnement, les terrains trop raides, et à fortiori le rocher, font échec à la progression. Toutefois, une fois atteint un substratum rocheux, rien n'empêche de poursuivre le sondage par carottage classique.

Cette méthode n'a pas encore vu le jour au MAROC, peut être par manque d'information ou de sensibilisation. Elle est plus chère que le sondage classique, mais donne des résultats incomparablement supérieurs. On notera toutefois que l'Office National d'Electricité a prévu la méthode vibropercussion dans le cahier des charges des reconnaissances de la première centrale nucléaire au MAROC, dont les travaux ont commencé fin 1985. Malheureusement, les terrains rencontrés étant rocheux, la mise en exécution n'a pas été possible.

Une entreprise marocaine détentrice du brevet dispose actuellement d'un équipement de sondage par vibropercussion.

Les essais d'eau se pratiquent couramment à l'occasion des sondages carottés. S'ils sont de peu d'intérêt pour les fondations des ponts, sauf à prévoir des caissons ou des batardeaux ou autres travaux mettant en jeu des problèmes d'épuisement de fouille et de renardage, ils sont en revanche fondamentaux pour tous les ouvrages hydrauliques et pour les projets nécessitant des fouilles sous le niveau phréatique.

Tous les types d'essais d'eau peuvent être pratiquement réalisés avec les matériels existant au MAROC, qui sont conçus pour les deux plus courants d'entre eux : l'essai MANDEL-LEFRANC en terrain meuble, l'essai LUGEON en rocher peu perméable.

L'appareillage nécessaire aux essais d'eau comporte en tout ou partie : une pompe, un dispositif de mesure de niveau dynamique, un dispositif de mesure de débit, un manomètre, un appareillage hydraulique à niveau constant, un chronomètre, des obturateurs simples ou doubles. Le reste fait partie du matériel de sondage. Cette panoplie permet d'exécuter les deux essais de base, mais aussi de nombreuses variantes, sachant que la mesure du coefficient de perméabilité revient toujours à fixer une loi à partir d'un modèle théorique, où intervient ce coefficient, et à mesurer, en les faisant varier, les paramètres que sont les dimensions, le débit et la pression.

Si le principe théorique est simple, et si la technologie paraît également simple au niveau des schémas, il n'en va absolument pas de même pour la pratique.

Ces essais sont en vérité très délicats et sujets à de nombreuses imperfections opératoires, souvent occultes. En outre, et circonstance aggravante, on sait que le coefficient de perméabilité s'exprime en puissance de dix, et que c'est précisément cette puissance que l'essai a pour but de déterminer. une erreur d'une seule unité sur le résultat à donc pour effet d'induire une erreur au niveau d'un projet de 10 fois moins ou 10 fois plus par rapport à la valeur réelle du débit filtrant.

La qualité des essais d'eau repose avant tout sur la compétence, le soin, et la conscience professionnels des opérateurs et de leurs surveillants. A cet égard, on ne peut qu'être horrifié par certaines rumeurs qui attesteraient de mal-façons commises délibérément. Des opérateurs peu scrupuleux auraient tendance à confondre la mesure des perméabilités avec la recherche du profil, exploitant le fait que l'authenticité des résultats est difficilement contrôlable.

Mais la qualité des essais d'eau repose aussi sur la qualité du matériel et sur la précision des mesures. Il convient de juger objectivement qu'au MAROC, comme en beaucoup d'autres endroits, un réel progrès pourrait être accompli à ce niveau à condition de consentir l'effort financier nécessaire (qui affecte l'entreprise aussi bien que son client), et d'exiger des normes plus élevées non seulement dans la rédaction des cahiers des charges mais encore et surtout, dans le respect de leurs clauses

lors des travaux.

Pour exécuter de tels forages on a recours à la méthode la plus économique. Passons rapidement sur les méthodes à moteur humain : barre à mine ou tarière, sans les désavouer pour autant dans le cas d'investigations aux ambitions modestes; Les méthodes mécaniques devront être adaptées au terrain et il n'est pas de propos ici de décrire les critères de choix qui sont fort complexes et subtils. Retenons seulement que trois grandes classes de forages destructifs existent qui sont : le rotary à l'eau, ou à la boue, ou à l'air la percussion à l'air comprimé au marteau hors du trou, la percussion à l'air comprimé au marteau fond de trou.

Les équipements correspondants sont bien représentés dans les entreprises marocaines. Les performances sont très variables selon les cas d'espèce, les plus faibles étant obtenues avec le marteau hors du trou, soit 50m environ. Le problème majeur reste celui des éboulements, le procédé se trouvant exagérément ralenti et renchéri dès que des tubages sont nécessaires.

Dans tous les cas, les sondages destructifs doivent être étalonnés par des sondages carottés.

L'enregistrement des paramètres de forage apporte une amélioration extrêmement importante à l'exploitation des forages destructifs. Cette opération consiste à mesurer plusieurs grandeurs mécaniques sur la machine de forage elle-même, partant du principe que les variations de ces grandeurs sont représentatives des variations du sol traversé. Pour prendre un exemple facile, la vitesse instantanée d'avancement sera plus rapide si le terrain traversé devient moins résistant. Mais il est bien d'autres paramètres mesurables, qui sont de précieux indicateurs, et dont le rapprochement permet d'établir une carte d'identité très précise sur l'outil, pression du fluide de forage, onde réfléchie en percussion, etc....

Les mesures étant tellement fines et rapidement variables, seul leur enregistrement permet une exploitation efficace. Cet enregistrement qui est fait sur graphique, peut être doublé par un enregistrement, numérique sur support magnétique dont le traitement informatique permet une analyse systématique extrêmement féconde.

L'enregistrement des paramètres peut être pratiqué sur les sondages carottés classiques dont il complète utilement l'exploitation géotechnique. Cette méthode, comme chacune de celles que nous décrivons, ne doit pas être considérée comme une panacée. Elle a ses limites qui sont d'abord celles du forage proprement dit. Si dans certains cas appropriés elle donne des résultats étonnants, dans d'autres cas les enregistrements sont peu contrastés et d'une interprétation difficile.

Actuellement une entreprise Marocaine dispose d'un équipement d'enregistrement de paramètres, en exploitation d'un brevet qui lui appartient.

Des sondages en mer ou en rivière sont fréquemment demandés, en liaison avec des projets d'extension, d'aménagement ou de construction de ports, ou avec des projets de ponts dont certains appuis sont prévus en lit majeur.

Il est certain que l'exécution d'un sondage n'est pas facilitée par cette situation.

Une solution élégante, à laquelle on ne pense pas toujours, consiste à éliminer le problème en construisant une plate-forme en remblai de manière à se mettre hors d'eau. C'est praticable à moindres frais pour de nombreux sondages en rivière, au MAROC, à condition de choisir une saison d'étiage.

Autrement il faut installer une sondeuse sur un radeau, avec tous les problèmes d'approvisionnement et de mise à flot du radeau que cela pose, augmentés des problèmes nautiques faciles à imaginer. La solution du radeau (ou tout engin flottant) n'est envisageable qu'en l'absence de houle et par faible clapot. Au delà d'une amplitude de houle de l'ordre de 20cm, le sondage devient très difficile et entraîne des casses de matériel à répétition. Cette solution est donc limitée aux rivières calmes et aux ports très bien abrités. Elle est absolument à exclure en site marin sauvage, sauf à disposer de navires de forage offshore de gros tonnage à positionnement automatique.

Il faut prendre garde à la marée, dont on s'accommode tant que le tirant d'eau du support flottant n'atteint pas le fond, mais qui peut provoquer des échouages temporaires très gênants. Dans les ports, il est nécessaire de réglementer sévèrement la circulation des navires autour des zones de sondage afin de préserver celles-ci des remous et du batillage.

En eau calme, la solution radeau permet à des équipes bien amarinées de travailler par 10m de fond environ. La profondeur du sondage sous le niveau du fond, quant à elle, n'est pas autrement limitée que pour un sondage terrestre. Des sondages carottés sur radeau ont récemment été effectués en rivière, dans la région de RABAT jusqu'à 50m profondeur, tubés jusqu'au fond, et avec essais pressiométriques.

Dès que les conditions requises pour l'utilisation d'un radeau ne sont plus respectées, il faut utiliser une plate-forme stable posée au fond.

La solution radicale est donnée par les plates-formes quadripodes auto-élévatrices. Il s'agit malheureusement d'un matériel naval très lourd qui n'est disponible au Maroc qu'à l'occasion de gros chantiers portuaires qui en justifient l'amenée pour des besoins autres que les sondages.

Une entreprise de sondages marocaine a réalisé en 1985 plusieurs dizaines de sondages à partir de plate-formes de ce type, par plus de 20m de tirant d'eau, au large des ports d'AGADIR et de MOHAMMEDIA.

A titre presque anecdotique, on peut citer les sondeuses sous-marines. Le LPEE exploite une micro-sondeuse sous-marine manipulée par plongeurs autonomes, qui exécute des carottages en rocher de 50cm de profondeur. Une autre société a essayé sans succès de mettre en oeuvre une sondeuse carottière de taille plus importante, qui fonctionnait parfaitement à l'air libre mais refusait obstinément d'en faire autant sous l'eau.

Divers essais peuvent être réalisés dans les sondages ou forages, sous réserve de quelques adaptations techniques, changements de matériel, et compatibilité du diamètre du trou avec les appareils que l'on désire y introduire. Outre les essais d'eau, déjà exposés, on peut arrêter provisoirement un sondage carotté ou un forage destructif pour y effectuer, entre autres, un essai au pressiomètre, un essai au scissomètre, un essai pénétromètre, une observation endoscopique, etc...La machine de sondage est souvent utilisée pour l'introduction et le retrait des appareils dans le forage à l'occasion de ces essais ou observations.

Essai pressiométrique normal c'est un essai in-situ effectué au sein même du terrain grâce à la réalisation d'un forage. Le principe consiste à introduire dans le forage une sonde cylindrique dilatable et déterminer à un niveau donné, sa variation de volume en fonction de la pression appliquée. L'analyse de la courbe obtenue effort-déformation permet de déterminer les caractéristiques géotechniques du sol et d'effectuer par conséquent les calculs de fondation.

L'originalité du pressiomètre actuel qui est dû à M.MENARD. repose sur la réalisation d'une sonde cylindrique tricellulaire assurant un champ de contraintes cylindriques au niveau de la cellule centrale de mesure.

La mise en place de la sonde dépend évidemment de la nature du terrain.

-Dans les sols bouillants, la sonde est mise en place soit par battage soit par pression statique soit par vibration (la sonde est protégée par un tube fendu). Ce mode de mise en place conduit à un remaniement du sol, mais celui-ci reste de faible influence sur les résultats en cas de terrains pulvérulents. Par contre dans les sols fins cette méthode est à déconseiller.

-Dans le cas général, la sonde est mise en place dans un forage préalablement exécuté. Le diamètre du forage doit être ajusté à celui de la sonde.

-par auto forage (cette méthode n'est pas encore utilisée au MAROC). L'inconvénient des essais pressiométriques est qu'ils nécessitent l'exécution d'un forage de bonne qualité d'une part et d'autre part ils sont de type rapide ne permettant pas de déterminer la consolidation et la stabilité à long terme.

L'avantage de ces essais est que le matériel est simple et léger d'une part et d'autre part ils peuvent être réalisés dans tous les types de sol à condition de bien choisir le mode de mise en place. Par ailleurs ils permettent de donner une idée quasi instantanée de la pression admissible.

Les essais pressiométriques sont bien adaptés à l'étude de fondations superficielles ou profondes .

Le scissomètre: c'est un essai de cisaillement en place réalisé dans les sols cohérents. On introduit dans le sol un moulinet et on lui exerce un couple de rotations à vitesse constante, grâce à un, couplemètre.

La résistance au cisaillement du sol est déterminée en fonction du moment maximal appliqué au train de tiges.

L'avantage de cet essai : matériel léger - mesures simples, mises en oeuvre et essais rapides - exploitations rapides des résultats - peu coûteux.

Son inconvénient est qu'on ne reconnaît pas la rotation réelle du moulinet, puisqu'il y a l'intervention de la déformation du ressort et celle des tiges d'entraînement du moulinet. Il y a aussi les frottements parasites inévitables et la méconnaissance de la mobilisation du cisaillement sur les faces terminales. Par ailleurs il y a le léger remaniement du sol dû au fonçage statique du moulinet.

L'essai est bien adapté surtout pour le calcul de stabilité à court terme de remblai ou des digues sur sol compressibles.

Le pénétromètre dynamique le principe consiste à enfoncer dans le sol un train de tiges, (terminées à leur extrémité d'une pointe ou d'un carottier) à l'aide d'une masse frappante tombant d'une hauteur déterminée constante.

Le principe de mesure est simple et consiste:

- soit à graduer les tubes tous les 20cm et à compter le nombre de coups nécessaire pour avoir un enfoncement de 20cm (méthode généralement utilisée).

- soit à mesurer l'enfoncement pour un nombre de coups donné.

L'essai se traduit par un diagramme de "pénétration dynamique" donnant par exemple le nombre de coups pour 20 cm en fonction de la profondeur.

Les pénétromètres dynamiques les plus courants sont ceux à tube carottier (S.P.I. décrit ci-dessus ou Mouton automoteur Delmag M2) et ceux à cônes (les plus nombreux).

Avantages : matériel robuste- puissance de pénétration élevée-peu coûteux - rapide - mesures simples.

Interprétation délicate- dans les sols fins mise en pression brutale de l'eau interstitielle.

Domaine d'utilisation : reconnaissance- reprétabilité du toit du rocher - idée sur la compacité du sol - prévision de possibilité de battage.

Le pénétromètre statique l'essai consiste à enfoncer dans le sol, à vitesse constante et lente, sous l'effet d'une poussée continue une pointe fixée à l'extrémité d'un train de tiges. Les paramètres mesurés sont l'effort de pointe et l'effort total. Ceux-ci peuvent être déterminés simultanément et d'une manière continue ou séparément et d'une manière discontinue.

On peut distinguer deux types d'exploitations des résultats :

- exploitation qualitative : en se calant au préalable sur quelques sondages mécaniques, on peut déterminer la nature et la position des couches, l'hétérogénéité du site et le niveau du toit du rocher.

- exploitation quantitative pour le dimensionnement des fondations superficielles et profondes (pour le premier cas l'interprétation ne donne pas toujours satisfaction).

Avantages : matériel simple - mesures rapides - essais peu coûteux et ne nécessitant pas de personnel spécialisé.

Inconvénients : matériel lourd n'accédant pas à tout site. Risque de refus sur les gros galets ou par frottement latéral dans les sables. Couches résistantes peuvent masquer des couches de faibles caractéristiques. Mesures faussées par des déviations sur galets.

Les essais de laboratoire se résument surtout en essais d'identification- essais de compressibilité et essais de cisaillement. Les essais d'identification qui peuvent être exécutés sur échantillons remaniés ou intacts, servent à identifier le sol (en plus de l'identification visuelle) et à déterminer ses caractéristiques physiques. Ils servent par ailleurs à sélectionner les échantillons représentatifs où seront effectués les essais mécaniques. En effet étant donné que ces derniers sont longs, on ne peut se permettre de les effectuer sur tous les prélèvements mais sur un nombre réduit représentatif.

Les essais de compressibilité ont pour but de déterminer les déformations du sol et par conséquent de prévoir les tassements que subira celui-ci sous les charges de service.

Quant aux essais mécaniques, ils permettent de déterminer la résistance au cisaillement du sol et par conséquent le taux de travail admissible.

Il existe depuis quelques années des ensembles de mesure intégrés qui permettent une mesure et une lecture, voire un enregistrement, des paramètres hydrauliques de essais d'eau. Il existe également des pompes mieux adaptées que les pompes de forage. Des entreprises de pointe, soucieuses de qualité, sont à même de proposer des équipements adéquats et pourraient, à condition de trouver un écho favorable auprès de leurs commanditaires, participer par l'exemple à la promotion de l'ensemble de la profession dans ce domaine.

Un sondage est un ouvrage onéreux qu'il convient de valoriser au maximum. Dans les terrains baignés par une nappe phréatique, il est recommandé d'équiper le trou avec un tube piézométrique, avant le détubage des revêtements provisoires et le retrait de la machine. Ce piézomètre permettra d'observer régulièrement le niveau de la nappe phréatique, ce qui peut être d'un intérêt majeur pour certains ouvrages sur le site desquels la nappe présente des variations saisonnières importantes. Des piézomètres devraient être systématiquement prévus, mais ce n'est hélas pas le cas, dans les forages donnant lieu à essais d'eau, de manière à relever le niveau statique réel, en dehors des perturbations créées par le sondage et par les essais eux-mêmes, sachant que ce niveau stabilisé est une des données nécessaires au calcul du coefficient de perméabilité. Le tube piézométrique, ou un simple tube non crépiné, peut également servir à des mesures diagraphiques ultérieures dans le forage, lorsque la nécessité apparaît après dépouillement des premiers résultats.

Dans tous les cas une solide borne en ciment et une fermeture dissuasive viennent coiffer le sondage ainsi équipé, pour qu'on puisse le retrouver sans peine et intact..

Le rebouchage des forages est une précaution nécessaire sur les sites d'ouvrages hydrauliques. Les multiples trous créés par les reconnaissances pourraient en effet créer autant de communications hydrauliques perturbant le fonctionnement de l'ouvrage et pourraient même affecter sa stabilité. Le rebouchage se fait par injection de coulis de ciment.

Les sondages destructifs sont une variante pauvre des sondages carottés. Leur intérêt réside dans leur faible coût, ce qui les rend attractifs lorsqu'un grand nombre de sondages est nécessaire. Cette circonstance survient par exemple, quand il s'agit de définir, par un semi de points, la position d'une surface de contact géologique, ou lorsqu'il s'agit de repérer des vides réperer de façon aléatoire à l'intérieur du sol.

Ces sondages ne produisent évidemment pas de carottes, mais outre la récupération en tête de trou des sédiments de forage évacuée dans le fluide de forage, il permettent l'observation plus ou moins précise de certains signaux, de différencier les terrains traversés : avance plus ou moins rapide, frappe plus ou moins sèche, bouchages, coincements, chute rapide, etc...