

P22

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES

Q. 53
R. 57

Quatorzième Congrès
des Grands Barrages
Rio de Janeiro, 1982

NOUVELLES TECHNIQUES DE RECONNAISSANCE (*)

par un groupe de travail du Comité Français des Grands Barrages (**)

FRANCE

1. INTRODUCTION

La description générale des méthodes de reconnaissance de la géologie des fondations a fait l'objet dans le passé de plusieurs communications émanant de groupes de travail du Comité National Français (1, 2, 3). Dans le présent congrès, un groupe de travail voisin traite du programme de reconnaissances (4).

Notre groupe de travail, comprenant des représentants de Maîtres d'Ouvrage, d'Ingénieurs-Conseils et de bureaux d'études géologiques, a dû en premier lieu faire l'inventaire, pour les éliminer, de toutes les méthodes classiques, entrées dans la routine des études de barrage depuis plus de 5 ans.

Il convient néanmoins de rappeler que ces méthodes classiques connaissent, pour nombre d'entre elles, des développements technologiques constants. Les méthodes d'interprétation, avec l'introduction des ordinateurs, progressent rapidement. Avant d'entrer dans le vif de notre rapport, nous passerons donc en revue les développements de quelques-unes de ces *méthodes classiques*.

En géologie, citons l'utilisation plus grande des méthodes de datation : palynologie, radioisotopes naturels. L'utilisation de l'isotope O-18 permet d'apprécier l'altitude du bassin versant d'une venue d'eau. Le tritium H-3 permet de dater une eau de moins de 25 ans d'âge.

(*) *New investigation methods.*

(**) *Ce groupe de travail animé par J. Lakshmanan (Compagnie de Prospection Géophysique Française) a réuni Y. Bertrand (C.P.G.F.), A. Pautre (Géoconseil), G. Bresson (Direction Départementale de l'Agriculture, Vendée), G. Flepp, P. Florentin, P. Londe (Coynet et Bellier), G. Comès, P. Deletie, T. Doucerain (Electricité de France).*

En géophysique, la sismique réfraction, les sondages électriques et la microgravimétrie voient apparaître des techniques d'interprétation avec ordinateur. La tendance est l'utilisation de techniques d'interprétation itératives (automatiques ou interactives) où l'on recherche la solution mathématiquement exacte, la plus proche d'une solution initiale géologiquement plausible. Les enregistreurs sismiques ou électriques à mémoires digitales permettent des mesures de qualité accrue. L'étude statistique d'études réalisées sur divers sites permet de mieux corréliser mesures géophysiques et paramètres géotechniques (5). La « microsismique » ou « petite sismique » voit l'étude des ondes transversales et de la forme des signaux se développer (6), notamment dans le cadre des études séismologiques (interactions sols-structure).

En forage et sondage, les techniques de prélèvement d'échantillons intacts en sols fins ou hétérogènes se développent et se généralisent. Mais l'introduction des mesures de paramètres de forage (diagraphies instantanées) a bouleversé les habitudes, et fait l'objet d'un développement important du présent rapport.

Les essais in situ pour la mesure de paramètres géotechniques se développent et se normalisent, tant pour les sols (pressiomètres) que pour les roches (dilatromètres).

Notre groupe de travail a sélectionné sept techniques dites « nouvelles », avec bien sûr une part d'arbitraire, plutôt que d'essayer de dresser un catalogue complet des méthodes nouvelles. Nous avons interrogé de plus divers confrères, pour essayer de ne pas omettre des techniques nouvelles intéressantes. Pour certaines de ces méthodes, il s'agit de méthodes déjà existantes dans les domaines miniers et surtout pétroliers, où l'importance des investissements permet de consacrer des sommes importantes à la recherche et au développement. Nous examinerons alors leur adaptation (simplification et miniaturisation) et leur application aux domaines du Génie Civil et des Grands Barrages.

2. LE PANNEAU SISMIQUE EXEMPLE DU SILLON DE L'EAU D'OLLE (Aménagement de Grand-Maison)

Principe

La sismique-réfraction de surface est prise en défaut lorsque les exigences de l'ingénieur demandent des déterminations plus fines et des schémas moins simples que ceux de couches tabulaires et homogènes. La méthode des panneaux sismiques entre forages tente de répondre à deux questions :

- Détermination fine des zones de fracturation du rocher
- Recherche de structures qui ne peuvent apparaître en sismique de surface (couches lentes sous des couches rapides).

On met en place dans un forage une série de capteurs sismiques et on émet un signal (explosif ou frappe) dans un autre forage et ce, à diverses profondeurs (Fig. 1). Pour chacun des tirs, un laboratoire sismique enregistre les temps de parcours émission-réception. De plus, la connaissance des distances par mesure d'inclinométrie des forages permet à un calcul automatique de répartir les vitesses sismiques dans le plan des forages (7).

Ce calcul est itératif. Il suppose que le panneau entre les forages est décomposé en carrés ou rectangles de vitesses différentes. A chaque itération, il est effectué :

- un calcul de la forme des rayons sismiques courbés par réfraction
- une modification de chacune des vitesses, telle que l'écart quadratique entre temps mesurés et temps calculés va en diminuant.

Le procédé peut être appliqué à des mesures :

- entre forages
- entre forage et sol
- entre galeries dans un plan horizontal ou vertical

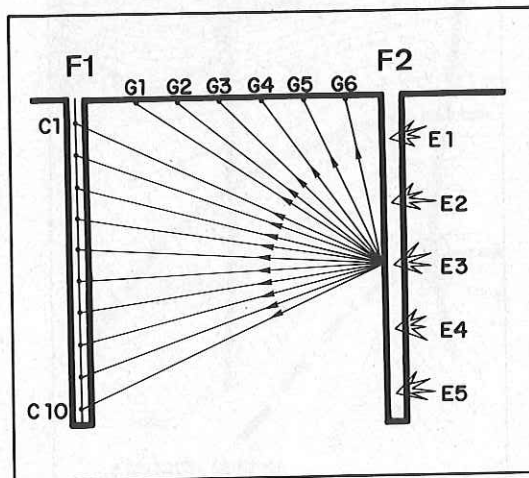


Fig. 1

Principe du panneau sismique

Basis of a seismic panel

F1 : forage de réception, F2 : forage
d'émission
C1-C10, G1-G6 : capteurs
E1-E5 : émission (tirs ou frappe)

F1: receiving drill hole, F2 : transmitting
drill hole
C1-C10, G1-G6: transducers or geophones
E1-E5: transmitters (explosives or mecha-
nical strikes)

Application à la recherche d'un sillon au Verney

Dans le cadre de l'aménagement hydroélectrique de GRAND-MAISON, l'étude d'une première implantation de l'usine souterraine du Verney a conduit à rechercher un éventuel sillon glaciaire étroit, risquant d'échapper à une prospection sismique de surface.

Trois forages de 50 à 80 m, de part et d'autre de l'éventuel sillon, ont été réalisés. Six tirs ont été effectués dans l'un des forages et 12 capteurs ont été disposés le long de chacun des deux autres forages. Sur les enregistrements correspondants, il a été relevé les temps de première arrivée entre chaque point de tir et chaque capteur.

La carte en courbes de niveau de la répartition des vitesses dans le sous-sol (Fig. 2) illustre les résultats obtenus par cette méthode.

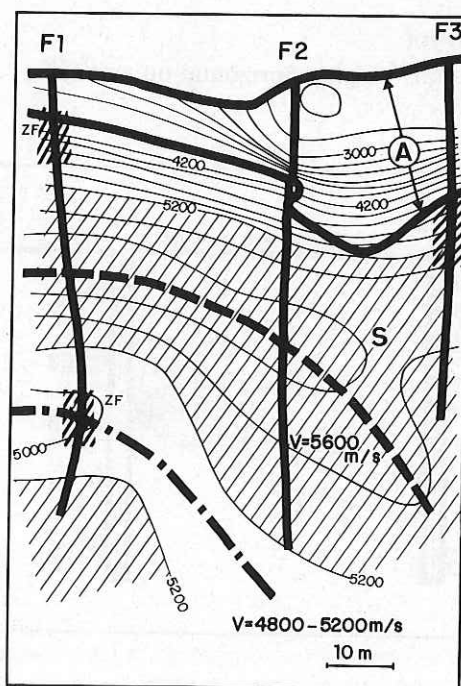


Fig. 2
Panneau sismique — Résultats au Verney
Verney seismic "panel" results

F1, F2, F3 : forages ; A : alluvions
ZF : zone fissurée ; S : surcreusement possible
5200 : vitesse en m/s

F1, F2, F3: drill holes; A: alluvium
ZF: fissured zone; S: axis of buried valley
5200: velocity in meters/second

La solution indique la présence d'une zone superficielle à faible vitesse (2 600 à 3 000 m/s) reposant sur une zone plus profonde à vitesse élevée (5 000 à 5 500 m/s). La largeur de la zone de transition équivaut au pas du réseau et ce dernier correspond au pouvoir séparateur de la méthode de calcul. Il est probable que la largeur réelle de la zone de transition est nettement plus faible.

Sensibilité de la méthode

Une étude de la sensibilité de la méthode a été effectuée pour voir dans quelle mesure le processus est susceptible de détecter la présence d'une hétérogénéité locale. Le modèle présenté ici (Fig. 3a) représente un sillon d'environ 20 m de profondeur, 15 m de largeur, situé à 6 m à gauche de l'axe de la figure. Les temps théoriques de propagation à travers ces modèles sont considérés comme des temps expérimentaux fictifs. Après 8 itérations, la solution (Fig. 3b) montre un sillon bien positionné, mais légèrement émoussé. La vitesse des alluvions ayant été choisie à 3 000 m/s, et celle du substratum à 5 000-5 300 m/s, la séparation entre ces deux faciès peut être choisie vers 4 000-4 200 m/s : la profondeur du sillon reconstitué est alors d'une quinzaine de mètres.

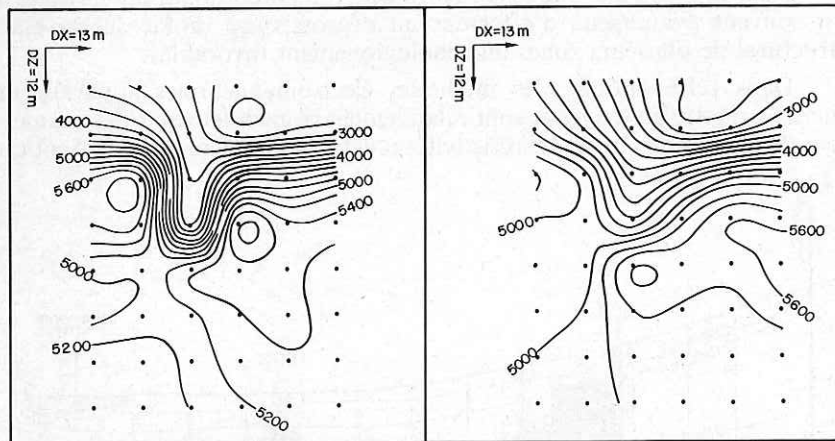


Fig. 3a

Modèle de sillon

Buried valley model

4 000 : vitesse en m/s

4 000: velocity (meters/second)

Fig. 3b

Deconvolution du sillon (8^e itération)*Buried valley deconvolution (8th iteration)*

4 000 : vitesse en m/s

4 000: velocity (meters/second)

Conclusions

Les anomalies apparaissent toujours, pourvu que leurs dimensions ne soient pas trop petites par rapport à la distance entre les forages.

Certaines anomalies qui n'apparaissent pas à partir de mesures de surface sont détectées par tirs entre forages.

Comme toutes les méthodes géophysiques, celle-ci a tendance à lisser les formes. Elle demande une déconvolution manuelle complémentaire. C'est ainsi que l'interprétation finale (Fig. 2) indique un léger surcreusement possible entre les sondages F2 et F3.

Il convient enfin de remarquer que depuis 2 ans, le procédé des panneaux sismiques est entré dans une phase industrielle, plus de 100 panneaux ayant été réalisés.

3. METHODES ELECTROMAGNETIQUES
CORRELATION AVEC LES METHODES SISMIQUES

Dans la recherche d'un site favorable à l'implantation d'un barrage, il est souvent avantageux d'effectuer un dégrossissage rapide sur le plan structural de plusieurs zones morphologiquement favorables.

Dans cette optique, les méthodes électromagnétiques apparaissent faciles à mettre en œuvre et sont relativement peu coûteuses. Elles permettent de dresser des cartes de résistivités à deux profondeurs d'investigation

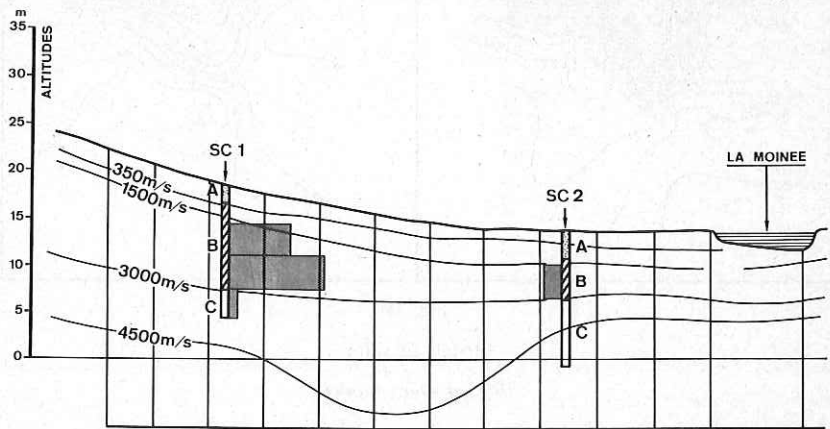


Fig. 4b

Barrage de Moulin Martin — Profil sismique

Moulin Martin dam — Seismic profile

3 000 m/s : vitesse sismique (hypothèse de vitesses croissantes avec la profondeur)

3 000 m/s: seismic velocity (continuously increasing with depth)

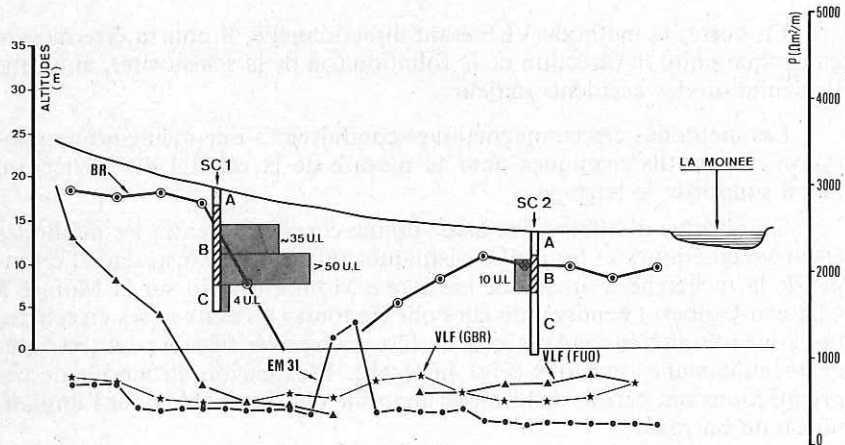


Fig. 4a

Barrage de Moulin Martin — Profils électromagnétiques

Moulin Martin dam — Electromagnetic profiles

EM 31 : profil électromagnétique	<i>EM 31: electromagnetic profile</i>
VLF : profil VLF	<i>VLF : VLF profile</i>
S.C. : sondage carotté	<i>S.C. : core drill</i>
U.L. : perméabilité en unités Lugeon	<i>U.L. : permeability (Lugeon units)</i>
BR : toit du bedrock d'après VLF	<i>BR : bedrock (according to VLF)</i>
GBR : émetteur Grande-Bretagne	<i>GBR : British transmitter</i>
FUO : émetteur France	<i>FUO : French transmitter</i>
A : couverture meuble	<i>A : top soil</i>
B : rocher fissuré	<i>B : fissured rock</i>
C : rocher compact	<i>C : sound rock</i>

et des profils où sont représentées l'épaisseur de la zone altérée de surface et les éventuelles zones faillées.

La première investigation consiste en une prospection au résistivimètre EM 31 de GEONICS (émetteur-récepteur électromagnétique) qui, sans électrode, permet de mesurer la résistivité apparente du sous-sol jusqu'à 5-6 m de profondeur.

La deuxième investigation est faite avec le récepteur VLF (1) EM 16 + EM 16 R de GEONICS qui, à partir d'émetteurs VLF fixes existant dans différents pays (France, Grande-Bretagne, USA, URSS), mesure la résistivité du sous-sol jusqu'à une profondeur de 50 à 60 m. En outre, la mesure en chaque point du déphasage entre l'onde VLF et la fréquence du courant induit dans le sous-sol permet, grâce à des abaques (8), de calculer l'épaisseur de la zone altérée de surface (dont la résistivité aura été obtenue avec le résistivimètre EM 31) et la résistivité du substratum dans l'hypothèse d'un modèle simplifié à deux couches.

(1) Very low frequency (gamme de 15 à 25 kHz).

En outre, la méthode VLF étant directionnelle, il pourra être mesuré en chaque point la direction de la foliation (ou de la schistosité), ainsi que l'orientation des accidents majeurs.

Les méthodes électromagnétiques conduisent à une meilleure implantation des profils sismiques pour la mesure de la célérité du rocher qui devra supporter le barrage.

On observe d'ailleurs une assez bonne corrélation entre les méthodes électromagnétiques et les profils sismiques réfraction. Ainsi, dans l'exemple de la recherche d'un site de barrage à Moulin-Martin sur la Moinée à Château-Guibert (Vendée), où elles ont été toutes les deux mises en œuvre, une zone très altérée a été détectée et s'est trouvée vérifiée lors des sondages de reconnaissance carottés (Fig. 4a et 4b). L'extension en amont de ces prospections ont permis de localiser une zone plus favorable pour l'implantation du barrage.

4. L'UTILISATION DE L'ENREGISTREMENT DE PARAMETRES EN FORAGE DANS LES RECONNAISSANCES

Généralités

Ce procédé consiste à enregistrer plusieurs paramètres physiques en cours de forage pour permettre de mieux définir les différents horizons géologiques traversés. Cette méthode a été utilisée, soit pour des forages destructifs au marteau, soit pour des forages destructifs rotatifs. Les premières utilisations de cette technique ont été réalisées dans la prospection pétrolière ; ses premières applications en Génie Civil ont maintenant près de dix ans.

Le procédé le plus adapté aux variations lithologiques des horizons superficiels (alluvions, éboulis, gore) est l'enregistreur de paramètres installé sur un forage destructif rotatif. Dans les milieux rocheux, le sondage rotopercutant, plus économique, permet d'obtenir des rendements plus importants. Actuellement, pour ces forages destructifs, deux types d'enregistreurs sont fréquemment utilisés :

- enregistreur Lutz (9), (10)
- enregistreur Solétanche (Enpasol) (11).

En général, ces appareils enregistrent instantanément en fonction de la profondeur, quatre paramètres liés à la perforation :

- la vitesse instantanée de perforation
- la poussée sur l'outil
- le couple de rotation (sondages rotatifs)
- (ou) — la vibration de l'outil (sondages roto-percutants)
- la pression du fluide de perforation.

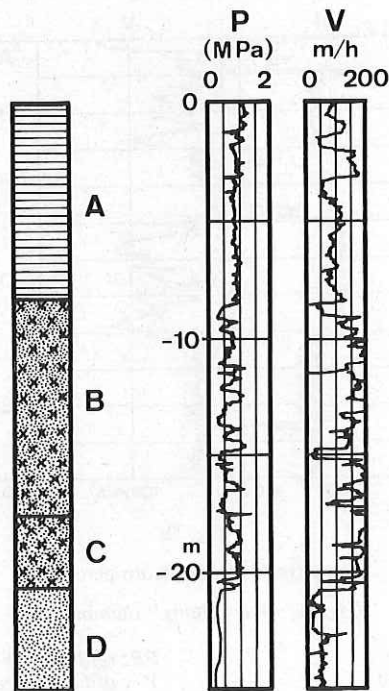


Fig. 5a

Paramètres de sondage (sondeuse rotative)

"Logging while drilling" (rotary drill)

A : argile silteuse
 B : alternance d'argile et de silt
 C : silt
 D : sable fin
 P : pression du fluide
 V : vitesse d'avancement

A : silty clay
 B : layered clay and silt
 C : silt
 D : fine sand
 P : fluid pressure
 V : drilling speed

Ces paramètres sont inscrits directement sur une bande de papier graphique dont le déroulement est proportionnel à l'avance de l'outil (voir exemples, Fig. 5a et 5b).

Les forages destructifs avec enregistrement de paramètres ont donné des résultats très positifs dans plusieurs reconnaissances. Dans des cas très particuliers (éboulis, moraines, lapiaz, fissures karstiques ouvertes ou colmatées) ces enregistrements donnent parfois de meilleures informations que les sondages carottés. En effet, dans ces formations, il y a destruction des horizons non consolidés, le carottage est souvent incomplet et il est parfois impossible de déterminer avec précision la position des blocs, des fissures et la nature du remplissage.

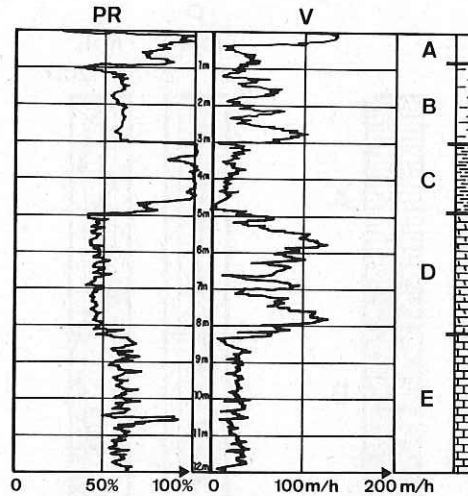


Fig. 5b

Paramètres de forage (roto-percussion)

"Logging while drilling" (hammer drill)

PR : percussion réfléchie
 V : vitesse d'avancement
 A : limons
 C : argile compacte
 E : calcaire compact
 B : sable et argile
 D : calcaire très fissuré

PR: reflected vibration
 V : drilling speed
 A : top soil
 C : compact clay
 E : compact limestone
 B : sand and clay
 D : fissured limestone

Une certaine expérience s'est révélée nécessaire pour bien analyser les particularités des enregistrements ; en effet, les passages continus entre certains faciès sédimentaires comme des sables argileux à des argiles sableuses et des argiles, ne se traduisent pas par des modifications sensibles sur les enregistrements.

Cette méthode a apporté des informations géologiques, non seulement sur le massif rocheux (altération, fracturation, cavités), mais également sur les formations meubles superficielles (moraines, éboulis, alluvions, formations lacustres ou marines).

Les sondages carottés restent de toute façon absolument nécessaires pour :

- obtenir la connaissance préalable des terrains qui seront traversés, afin d'adapter les conditions de perforation et d'étalonner les différents enregistrements.
- exécuter des essais in situ.
- effectuer des prises d'échantillons pour les essais en laboratoire.

Le rapport entre le nombre de sondages carottés et celui des forages destructifs avec enregistreur de paramètres ne peut être fixé à priori et doit être adapté à chaque étude.

Cette méthode est d'autant plus utile que les formations successives présentent des caractéristiques (mécaniques ou granulométriques) contrastées.

Exemples d'utilisation

Cette technique a été utilisée avec succès dans différents sites :

Canal de l'Echaillon

Reconnaissance de la nature (alluvions, éboulis, moraines) d'un remplissage de vallée au droit d'un canal d'amenée. Forage de 215 m avec carottage en fond de forage.

Barrage du Mont Cenis

Détermination de la structure géologique à l'aplomb d'un glissement de terrain et carottage du bed rock (forages de 178 et 93 m). Localisation de zones ouvertes et précision sur l'importance des blocs dans les éboulis.

Barrage de Grand-Maison

Etude systématique du remplissage alluvial sur le site du barrage de Grand-Maison. Plusieurs dizaines de forages destructifs ont été réalisés et, en particulier, une vingtaine sous la recharge aval de l'ouvrage (Fig. 6).

Ces reconnaissances ont permis d'identifier le bed rock rocheux et les horizons meubles suivants :

- Eboulis
- Alluvions sablo-graveleuses
- Moraines et moraines compactes
- Les silts et argiles.

Les résultats obtenus ont permis de préciser les décapages nécessaires pour la réalisation de l'ouvrage et les premiers travaux ont permis d'observer une structure géologique tout à fait comparable à celle fournie par l'analyse des forages destructifs.

Barrage du Sautet.

Détermination du profil et du remplissage d'une ancienne vallée contournant les appuis de l'ouvrage (forages de 150 à 200 m).

Travaux complémentaires après la construction d'un grand barrage (80 m) en Amérique latine.

Après l'apparition d'une résurgence en rive, à une centaine de mètres à l'aval du barrage, des forages destructifs ont été réalisés en roto-percussion, à partir de la crête et des talus du barrage, ainsi qu'à partir du terrain naturel à l'aval. Ils ont permis de confirmer avec précision le zonage du barrage et de préciser la structure de la fondation alluviale très hétérogène.

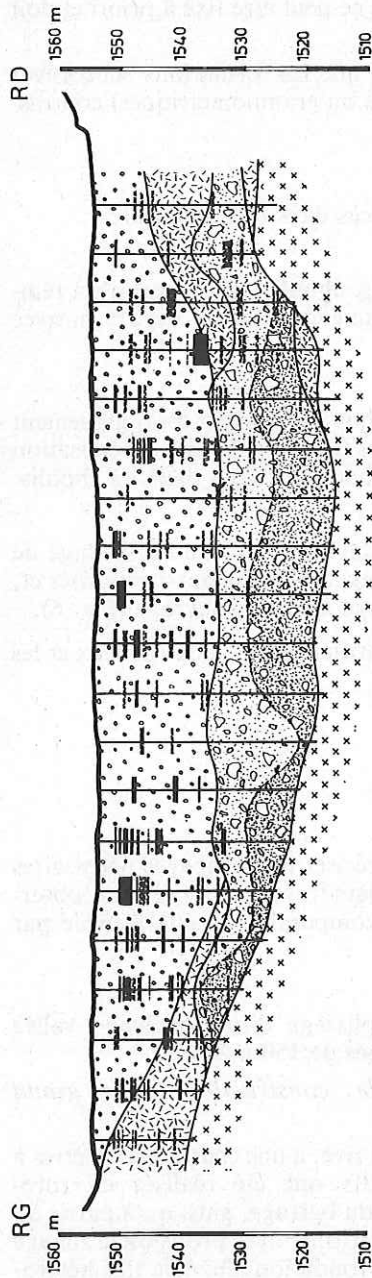


Fig. 6

Barrage de Grand Maison — Interprétation des sondages destructifs

Grand Maison dam — destructive drilling interpretation

- RG : rive gauche
- RD : rive droite
- g : horizons sablo-silteux
- f : horizons silto-argileux
- e : éboulis
- d : alluvions sablo-graveleuses
- c : moraines
- b : moraines compactes
- a : rocher cristallin

- RG: left bank
- RD: right bank
- g : sandy silt layers
- f : clayey silt layers
- e : talus
- d : sand and gravel alluvium
- c : till
- b : compact till
- a : crystalline bedrock

Ces forages ont été équipés en piézomètres dans les zones critiques de la fondation et pour certains, équipés d'une membrane étanche pour permettre des mesures piézométriques continues (Piézoфор).

On a ainsi pu établir avec précision une carte des niveaux piézométriques dans le barrage et la fondation, mettre en évidence des surpressions interstitielles en profondeur, distinguer des écoulements en pied de talus et des résurgences plus lointaines, et déterminer le système d'injection et de drainage approprié pour y remédier.

Corrélation entre paramètres de forage et essais in situ.

Pour un site de barrage en Afrique, la reconnaissance sur une superficie de 20 hectares d'un remplissage alluvial hétérogène, dont l'épaisseur maximale dépasse 60 m, a exigé la mise en œuvre de moyens importants et divers.

Pour utiliser les procédés les plus adaptés aux terrains traversés et susceptibles de fournir les informations les plus utiles dans les meilleurs délais, on a procédé à un étalonnage rigoureux de tous les moyens disponibles. En deux points du site, 7 forages ont été réalisés dans un carré de 4 m de côté :

- 1 sondage avec échantillonnage intact continu,
- 1 forage destructif à la boue avec essais SPT tous les mètres,
- 1 forage destructif avec enregistrement continu des paramètres de forage (vitesse d'avancement, pression de fluide de perforation, poussée sur l'outil, couple moteur) et diagraphies géophysiques,
- 1 essai de pénétration statique (pénétromètre de 20 tonnes)
- 1 essai de pénétration dynamique
- 1 forage destructif avec essais scissométriques tous les mètres
- 1 forage destructif avec essais pressiométriques tous les mètres.

Pour les forages avec enregistrement, on a maintenu constants la poussée sur l'outil et le couple moteur, et analysé les variations de deux autres paramètres : la vitesse d'avancement, qui diminue avec la compacité, et la pression du fluide de perforation, qui est faible dans les sables et les grès, et élevée dans les argiles et les marnes.

On a ainsi pu séparer les mesures effectuées sur les différents matériaux, essentiellement argiles, silts et sables fins, et en procédant à une analyse multifactorielle, établir de nombreuses corrélations. Certaines sont classiques et on ne présente ici que celles liées à la vitesse d'avancement.

- dans les argiles, la vitesse d'avancement peut être liée à la pression limite, et au résultat de l'essai de pénétration SPT,
- dans les sables, la vitesse d'avancement V (m/h) peut être liée à la résistance à la pénétration statique R_p (MPa) ou dynamique Q_d (MPa).

Les forages avec enregistrement de paramètres réalisés sur l'ensemble du site ont ainsi permis de mettre en évidence les différents niveaux argileux et sableux du remplissage alluvial et le contact avec le substratum, et également de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux (consistance des argiles, compacité des sables). La rapidité d'exécution et la possibilité de forer à grande profondeur, bien au-delà des limites atteintes par les pénétromètres statiques et dynamiques, sont des avantages supplémentaires essentiels.

Champ et limites d'application

Dans les différentes études réalisées, certains paramètres sont apparus comme particulièrement caractéristiques des horizons traversés, ces résultats sont reportés dans le tableau ci-dessous ; il faut noter cependant que ces résultats dépendent des conditions de l'essai et des conditions géologiques locales (présence ou non de la nappe, compacité des horizons alluvionnaires, etc.) qui doivent être bien connus avant de pouvoir interpréter valablement les enregistrements.

	Vitesse de Perforation	Pression Eau	Pression Outil	Couple	Vibration
Eboulis, remblais	× i	× i		× i	× f
Sables	× F	f			f
Argiles et silts	× F	× F			f
Galets, graviers	× i	× f		× F	m
Moraines	× F	i	×		m
Rocher compact	× f	f	×		× F
Rocher altéré	× i	i			× m
Fissures ouvertes	× F	× f			× FF
Vides francs	× F	× f	×		× FF
Fissures argileuses	× F	× F			× f

× paramètre caractéristique

f : faible
 m : moyen
 F : fort
 FF : très fort
 i : irrégulier

Cette technique apparaît comme particulièrement adaptée à diverses recherches géologiques souvent délicates et longues à réaliser par des sondages carottés classiques :

- la recherche de la cote d'un bed rock dans une vallée alluviale comblée par des moraines ou des alluvions
- les études structurales en terrain sédimentaire

- la recherche de la cote du rocher en place sous un éboulement
- les reconnaissances dans les moraines à gros blocs
- la localisation de coulées basaltiques interstratifiées dans les alluvions
- la détermination des formations injectables (soit alluvionnaires, soit rocheuses)
- la localisation de cavités karstiques
- la localisation des niveaux désorganisés, superficiels (fontis, remblais, vides...)
- une estimation de l'état de fissuration du rocher.

Cette méthode est maintenant largement utilisée dans tous les domaines du Génie Civil. L'expérience actuelle dépasse largement la centaine de kilomètres de forage. Il est toutefois très important de noter que la qualité des résultats obtenus dépend non seulement du matériel mis en œuvre, mais de la qualité et de l'expérience du personnel d'exécution. Certains échecs de ces méthodes peuvent être imputés à l'inexpérience ou au manque de suivi.

5. RECONNAISSANCES HYDROGEOLOGIQUES DANS DES MORAINES

Le prélèvement d'échantillons et les essais d'eau dans les terrains très hétérogènes tels que des moraines à gros blocs par des moyens de forage classiques est actuellement lent et onéreux, avec une qualité souvent insuffisante. L'utilisation de différentes techniques nouvelles (OD, ODEX, vibropercussion, etc.) se développe actuellement en France. L'exemple ci-après concerne une de ces méthodes.

En rive droite de l'Ariège, au droit du site de barrage de Ferrières, la plaine alluviale actuelle recouvre un ancien fond de vallée glaciaire remblayé par des dépôts morainiques sur une épaisseur pouvant atteindre 80 m.

La mise en eau de la retenue provoquera des fuites dont il importe d'estimer le débit et l'influence sur la piézométrie à l'aval et pour ce, de déterminer :

- la profondeur du bed-rock
- la perméabilité du remplissage
- la piézométrie

Les techniques traditionnelles de carottage se sont avérées ici très lentes pour traverser les blocs : 4 mois pour un sondage de 70 m.

La technique VPRH mise en œuvre, se caractérise par la descente simultanée, grâce à un dispositif mécanique très puissant, d'un double

Q. 53-R. 57

train de tiges coaxiales de diamètre 5'' et 3'' (Fig. 7a et 7b). L'extérieur assure le rôle de porte-outil et de soutènement, l'intérieur permet la remontée des déblais.

La puissance de la sondeuse a permis de descendre jusqu'au bed-rock, avec des rendements pouvant atteindre (essai d'eau compris) 20 m/jour.

Grâce au double tubage, des essais d'eau de type LEFRANC ont pu être réalisés dans des poches de dimension variable, de façon rapide et précise. Le diamètre du tube central permet l'injection de débits de plusieurs centaines de litres/minute, le niveau d'eau étant contrôlé dans l'espace annulaire.

Enfin, la méthode de foration utilisée a permis d'installer facilement un équipement piézométrique.

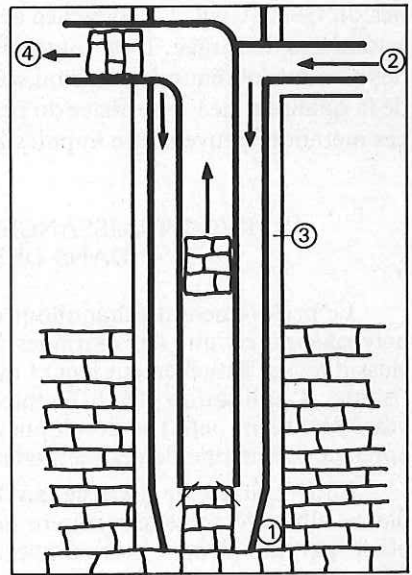
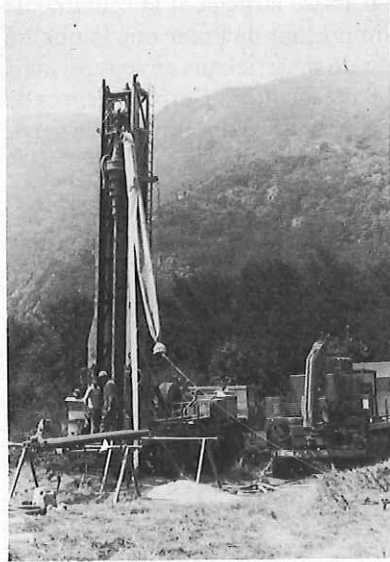


Fig. 7a

Sondeuse VPRH avec gaine plastique de récupération des matériaux

VPRH drill with plastic tube for recuperation of cuttings

Fig. 7b

Vue du train de tiges double-tube

Double column drilling

- (1) outil
- (2) air
- (3) tige de forage
- (4) récupération des matériaux

- (1) tool
- (2) air
- (3) drill column
- (4) evacuation of cuttings

6. MESURES PIEZOMETRIQUES CONTINUES EN FORAGE

Le Piézofor a été développé pour mesurer de façon continue la charge piézométrique à l'intérieur d'un massif rocheux ou de sols hétérogènes, en particulier de glissements de terrain.

Une membrane étanche, appliquée directement au rocher (ou bien à l'intérieur d'un tube crépiné scellé au terrain par un coulis de ciment se fissurant lors de la prise) empêche toute communication par le forage entre les différents niveaux aquifères. Une sonde mobile de mesure, isolée par deux obturateurs gonflables, peut être appliquée à tout niveau du forage (pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres) et permet d'obtenir un profil piézométrique complet, sans perturber le régime d'écoulement naturel.

Ce procédé a été récemment appliqué avec succès pour l'auscultation fine et le contrôle de la stabilisation d'un glissement de terrain menaçant la prise d'eau d'un grand barrage (12). La Fig. 8 montre la localisation en profondeur des surpressions induites par de fortes pluies.

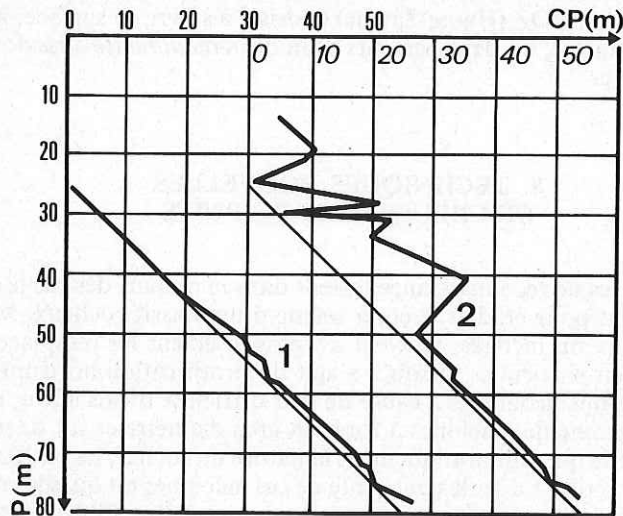


Fig. 8

Mesures piézométriques continues en forage

Piezometric measurements in drill holes

P : profondeur
 1 : avant les pluies
 CP : charge piézométrique
 2 : après de fortes pluies

*P : depth
 1 : before rains
 CP: piezometric head
 2 : after heavy rains*

7. MESURES CLINOMETRIQUES DE PRECISION PAR CAPTEURS INDUCTIFS

Les mesures de déformation en forage par procédés classiques nécessitent, soit un dépouillement assez long, soit un tubage spécial rainuré.

L'utilisation en forage d'une chaîne de *clinomètres à capteurs inductifs* (Clinofor, dans lequel les mouvements d'un pendule à lame fléchie dans un plan ou dans deux plans orthogonaux sont repérés par effet inductif) permet d'obtenir des mesures précises et fiables, en s'affranchissant de l'influence d'un système mécanique de guidage. Le signal électrique mesuré (fréquence du circuit inductif) n'est pas affecté par la longueur de la transmission, et la profondeur maximale d'utilisation peut atteindre 200 m environ. La précision des mesures angulaires est inférieure à 5.10^{-4} radian.

Ces mesures clinométriques de précision sont appliquées en particulier pour l'auscultation et la surveillance de structures ou de glissements de terrain.

Dans le cas où les glissements de terrain sont très importants, conduisant à une rupture du tubage, une nouvelle méthode (13) actuellement mise en œuvre à MARLIOZ (Haute-Savoie) consiste à suivre en surface, à l'aide d'un magnétomètre, les déplacements d'un *barreau aimanté* abandonné au fond du forage.

8. TECHNIQUES NOUVELLES DE CREUSEMENT DE PUIITS

Les galeries de reconnaissance restent dans la plupart des cas le moyen le plus adéquat pour étudier le cœur même d'un massif rocheux. Mais les puits, verticaux ou inclinés, peuvent avantageusement les remplacer dans certains cas, en particulier lorsqu'il s'agit de stratification horizontale. Ils ont été longtemps dédaignés à cause de leur difficulté d'exécution, mais la mise sur le marché de machines à forer en gros diamètre et sur de grandes hauteurs, quelle que soit pratiquement la nature du rocher, les rend maintenant plus attractifs. La seule contrainte de ces machines est qu'elles nécessitent l'exécution d'une galerie de base pour permettre l'introduction de l'outil qui sera tiré vers le haut pendant la phase d'alésage du trou pilote (technique dite « raise-drill » en diamètres 1,80 m, 2,40 m ou 3,60 m).

Sur le chantier de CHICOASEN (Mexique), de nombreux puits ont été exécutés par de telles machines au stade de la construction du barrage. Leur rapidité d'exécution, la modicité de leur coût et la qualité des observations géologiques faites sur les parois ont été telles qu'on a retenu la méthode pour l'exécution de quatre puits verticaux de reconnaissance dans les calcaires du site d'ITZANTUN, également au Mexique et ce, jusqu'à 160 m de profondeur.

Ces machines sont actuellement utilisées pour la réalisation de 4 galeries d'injection inclinées à 45° au barrage de GRAND-MAISON et comme avant trou pour des puits définitifs à MONTEZIC et GRAND-MAISON.

9. CONCLUSIONS

Nous avons examiné dans le présent rapport quelques méthodes nouvelles, ou d'application nouvelle en Génie Civil. Après une enquête préliminaire, nous nous sommes limités au choix — quelque peu arbitraire — suivant :

- *Les panneaux sismiques*
- *l'électromagnétisme*
- *les enregistrements de paramètres en cours de forage*
et la corrélation entre ces paramètres et les autres essais in situ
- *l'utilisation du forage destructif à « double tubage »* pour les essais d'eau
- les mesures *piézométriques continues* le long d'un forage
- l'étude des glissements par *clinométrie* et *magnétométrie*
- les *machines à forer les puits*

Le poids que nous avons accordé à la mesure des paramètres en cours de forage (vitesse d'avancement, vibration, couple, pression d'eau et poussée sur l'outil) correspond à l'importance que ces méthodes ont prise en France, ou à l'étranger sous l'impulsion de techniciens français.

*
* *

Ce recensement n'a pas la prétention d'être exhaustif et diverses méthodes récentes n'ont pas été citées :

- En géologie, l'utilisation des *photos satellite*, à des échelles pouvant descendre au 1/100 000^e ou même au 1/50 000^e.
- En géophysique, *la gravimétrie* (14) très largement diffusée dans d'autres secteurs du Génie Civil ; tracés routiers et de chemins de fer, centrales électronucléaires ; les puissants moyens de calcul actuels permettront bientôt son utilisation pour des sites de barrages, où les corrections de relief la rendent présentement peu usitée ; dès maintenant, quelques exemples d'utilisation dans les Alpes le long des canaux et à l'intérieur de galeries de dérivation en montrent l'intérêt.
- *La sismique réflexion* ; moyen de choix des pétroliers ; les méthodes « haute résolution » permettront bientôt son application à des problèmes structuraux subtabulaires moins profonds, ou même à des problèmes de recherche de la base des terrains désorganisés dans des glisse-

ments de terrain ; un essai prochain est envisagé sur un tracé de galerie d'amenée dans les Alpes.

- L'application des méthodes électriques (*électrofiltration et électromagnétisme*) aux recherches de fuites d'ouvrages a déjà été ébauchée (15), (16) ; un essai d'utilisation systématique d'une méthode électromagnétique sera prochainement tenté pour localiser les pertes du barrage du Sautet.
- En sondages mécaniques, les techniques de prélèvement *d'échantillons intacts* en terrain hétérogène cohérent progressent rapidement (citons en particulier la *vibropercussion*)
- Pour les *essais d'eau*, l'enregistrement continu des débits, pressions ou niveaux permet à la fois un meilleur contrôle et des plus grandes possibilités d'interprétation (on peut citer le « *Lugéographe* »)
- Pour les *essais in situ de mécanique des roches*, les essais en forage, le *Médératec-dilatometre* (17) notamment, deviennent d'usage courant du fait de leur moindre coût et du moindre remaniement du terrain ; les méthodes statistiques de dépouillement (critères de Schneider) s'appliquent aussi bien à eux qu'aux essais au vérin.

D'autres méthodes, plus nouvelles encore, peuvent être citées à titre prospectif :

- tracé automatique de linéaments sur photographies aériennes ou de satellites
- « radar » ou réflexion et transmission d'ondes électromagnétiques en général, pour la détection de cavités à faible distance (contrôle de revêtements de galeries)
- l'utilisation de l'électromagnétisme hélicoptère peut être envisagée au stade de la reconnaissance préliminaire en terrain très peu accessible
- mesure, à l'extérieur de sondes dilatométriques, de la pression interstitielle en cours de chargement.

*
* *

Les différentes techniques nouvelles qui ont été exposées viennent assurément compléter la panoplie des moyens déjà existants. Leur application permet d'arriver plus rapidement et plus sûrement à une meilleure connaissance des qualités et des défauts d'un site de barrage. Nous pensons néanmoins que le progrès vient simultanément du développement de techniques existantes et de l'application de méthodes nouvelles. Il convient de ne pas céder à des modes ; les méthodes classiques permettent de se référer à une somme d'expérience irremplaçable et l'utilisateur applique — sans « doute métaphysique » — les règles empiriques établies sur le S.P.T. par exemple, ou tout autre essai ou mesure classique. Les méthodes nouvelles deviendront à leur tour classiques au fur et à mesure que l'expérience et les corrélations s'accumuleront ; ceci est d'ores et déjà le cas pour les enregistrements en cours de forage.

RÉFÉRENCES

- (1) BELLIER, BERNEDE, BOLLO, J. DUFFAU, PERA, COMES, LAKSHMANAN, P. DUFFAUT, WILLM, MAZENOT, ROGISSART (1964)
La déformabilité des massifs rocheux, analyse et comparaison des résultats, Huitième Congrès des Grands Barrages, Edimbourg 1964, Question 28, R. 15.
- (2) GROUPE DE TRAVAIL DU COMITE FRANÇAIS (1970)
Quelques développements récents des moyens d'auscultation du massif rocheux, Dixième Congrès des Grands Barrages, Montréal, 1970, Question 38, R. 49.
- (3) J. HERRIOU, P. LEVRAT, M. SALEMBIER, G. VIGIER, J. VERNISSE (1976)
Etudes préliminaires d'aménagements de barrage, Douzième Congrès des Grands Barrages, Mexico, 1976, Q. 46, R. 2
- (4) GROUPE DE TRAVAIL DU COMITE FRANÇAIS (1982)
La reconnaissance des sites de barrages, Quatorzième Congrès des Grands Barrages, Rio de Janeiro, 1982, Q. 53, R. 55
- (5) Y. BERTRAND, J. LAKSHMANAN, J. ROUGE (1979)
Classement statistique de mesures sismiques et conception de barrages, comptes rendus, 4^e Congrès International Mécanique des Roches, Montreux 1979
- (6) B. SCHNEIDER (1967)
Moyens nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux, Annales de l'I.T.B.T.P., juillet-août 1967, n° 235-236, Série Sols et Fondation (62)
- (7) M. LA PORTE, J. LAKSHMANAN, M. LAVERGNE et C. WILLM (1973)
Mesures sismiques par transmission — Application au Génie Civil, Geophysical Prospecting, vol. XXI, n° 1, 1973
- (8) F.C. FRISCHKNECHT (1967)
Fields about an oscillating magnetic dipole over a two layer earth and application to ground and airborne electromagnetic surveys, Quarterly of the Colorado School of Mines, vol. 62, n° 1, janvier 1967
- (9) J. LUTZ (1978)
Les diagraphies instantanées en forage, Chantiers Magazine, n° 91, avril 1978, Paris
- (10) J. LUTZ (1981)
Enregistrements de paramètres, Travaux, n° 522, février 1981, Paris
- (11) P. RICHEZ (1981)
L'enregistrement des paramètres de forage, Travaux, n° 522, février 1981, Paris
- (12) P.J. DEBREUILLE, J. FRANCO, P. LONDE (1979)
Auscultation fine d'un glissement de terrain à l'aide d'instruments nouveaux, comptes rendus, 4^e Congrès International de Mécanique des Roches, Montreux, Suisse, vol. 2, p.p. 77-87

- (13) V.A. BOGOLOVSKY, A.A. OGILVY, N.A. STRAKHOVA (1977)
Magnetometric and electrometric methods for the investigation of the dynamics of landslides, *Geophysical Prospecting*, 25, p.p. 280-291
- (14) J. LAKSHMANAN, M. BICHARA, J.C. ERLING (1977)
Etudes de fondation en terrain caverneux, place de la gravimétrie, *Bull. Liaison Labo. P et Ch.* 92, novembre-décembre 1977, Paris
- (15) M.F. BOLLO, J. RIVET (1968)
Progrès récents pour l'auscultation des phénomènes de circulation des eaux souterraines, *Symp. Int. de Mécanique des Roches*, Madrid 1968
- (16) J. MOLINARI, R. CORDA, J. GUIZERIX, R. BARBEDETTE, M.F. BOLLO et al (1976)
Méthodes de recherche de l'origine des infiltrations des barrages et de leurs fondations. Evaluation des fuites d'un réservoir en terrain perméable, 12^e Congrès des Grands Barrages, Mexico 1976
- (17) G. COMES (1965)
Contribution à la détermination des caractéristiques mécaniques d'une fondation rocheuse, *revue Travaux*, Paris, novembre 1965

RÉSUMÉ

Après avoir examiné rapidement les progrès récents des techniques de reconnaissance, notamment dans le domaine de l'informatisation, les auteurs ont retenu une série non exhaustive de méthodes, soit nouvelles, soit d'application nouvelle aux études de grands barrages.

En allant du plus léger au plus lourd, il a été décrit, en premier, deux techniques géophysiques nouvelles, les panneaux sismiques et les méthodes électromagnétiques. Les panneaux sismiques consistent en un traitement mathématique élaboré des mesures sismiques par transparence, entre 2 forages, ou entre 2 galeries, permettant une analyse plus fine que la sismique de surface. Les méthodes électromagnétiques permettent d'établir des cartes et profils de résistivité avec des vitesses d'exécution très grandes. Elles peuvent servir de dégrossissage et de méthodes de détection d'accidents verticaux étroits. Les diagraphies instantanées, ou enregistrement des paramètres de forage, devenues d'utilisation très courante en France ou par les organismes français à l'étranger, font l'objet d'une description assez détaillée. Il s'agit de mesures réalisées pendant l'exécution même du forage et, en particulier, de la vitesse d'avancement. Après un rappel des principes, divers exemples d'application sont détaillés et, en dernier, le champ et les limites d'application considérées. Il est maintenant courant de remplacer une bonne partie des sondages carottés par des sondages destructifs avec enregistrement.

Deux chapitres traitent ensuite des essais et mesures hydrogéologiques. Le premier concerne les essais d'eau réalisés à l'aide de machines de forage à double tubage, en terrains très hétérogènes (moraines). Le deuxième concerne la mesure piézométrique en continu le long d'un forage.

On évoque ensuite une technique nouvelle de mesures clinométriques en forage, pour l'étude des glissements de terrain. En dernier lieu, on décrit l'application de techniques nouvelles de creusement de puits de reconnaissance.

SUMMARY

After examining recent progress of classical methods, particularly concerning the use of computers, the authors have selected a series of new methods. This list is not supposed to be complete, and includes either really new methods, or methods newly applied to the study of large dams.

Starting from the lightest methods, two geophysical methods have been considered, the seismic « panel » and the electromagnetic methods. Seismic « panels » are seismic measurements by transmission between two drill holes, or between two adits. The method includes a sophisticated computer procedure, allowing much more detailed investigation than by surface measurements. Electromagnetic measurements, using inductive coupling, give resistivity profiles and maps at low cost. They can be used for preliminary surveys or for location of narrow fault zones.

“ Logging while drilling ” techniques have become very popular in France, or with French organizations working abroad. These methods have been described quite completely ; they consist in measuring physical drilling parameters, mainly drilling speed. After examining the principles, several examples are described. The field and limits of these techniques are considered. It is now usual to replace a large part of conventional core drilling by destructive drilling methods, using “ logging while drilling ” measurements.

Two chapters concern hydrogeological tests and measurements. The first describes permeability tests made with a double tube drill in difficult soil conditions (moraines). In the second chapter, continuous piezometric measurements along a drill hole are described.

Lastly, two short notes describe a new clinometer for the study of landslides, and the use of new large diameter well drilling techniques.