

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES
Journées d'études "Auscultation des Ouvrages"
29 et 30 Novembre 1982

Auscultation d'Ouvrages par Méthodes Géophysiques

Par J. LAKSHMANAN (1)

Il convient de distinguer deux familles d'interventions géophysiques dans l'auscultation d'ouvrages :

- le diagnostic, par mesures comparatives entre ouvrages différents
- la surveillance, par mesures répétées sur un même ouvrage.

Je développerai ici plutôt la surveillance, en ne prenant dans le diagnostic que quelques exemples, essentiellement consacrés à l'auscultation du béton.

Je tiens à remercier tout particulièrement les confrères suivants, qui par des exemples et de la bibliographie, m'ont permis de compléter le présent exposé :

L. PAREZ et J. HURTADO Sol Essai , J. PAQUET, C.E.B.T.P.

P.M BIC et J.M. COGNON, Sol Compact et Techniques Louis Ménard

M.F. BOLLO, Société de Recherches Géophysiques

M. RAT, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

(1) Ingénieur Géologue E.N.S.G., Directeur Général, Cie de Prospection Géophysique Française - 77/79 Avenue Victor Hugo à RUEIL MALMAISON 92500.

I. - DIAGNOSTIC COMPARATIF D'UN OUVRAGE OU D'UNE FONDATION

I.1. Sols et matériaux d'emprunt

Je ne développerai ici que quelques méthodes consacrées au contrôle d'un ouvrage existant, en excluant les méthodes géophysiques de prospection préliminaire.

Citons les exemples suivants :

- Auscultation par méthode électromagnétique des berges de la retenue du Sautet ainsi que celle des digues existantes de l'Isère : il s'agissait de cartographier la résistivité des 5 mètres de terrain constituant le corps de digues existantes, en vue de rechercher des zones perméables (fig. 1).

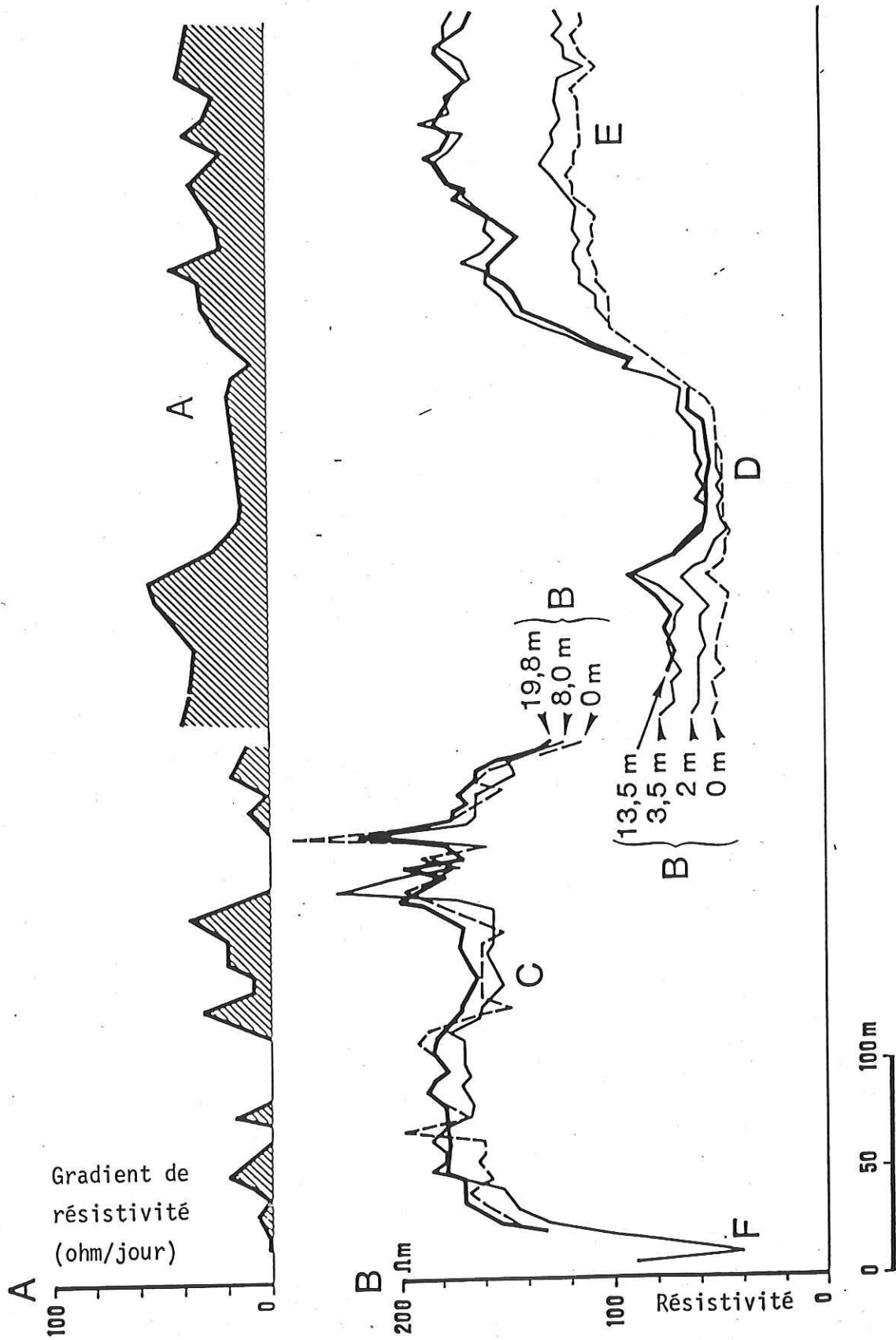
- Recherche de fuites en fond de retenue de barrage, par mesure de potentiels naturels d'électrofiltration. Cette méthode, mise au point en URSS, a été utilisée avec succès sur 5 retenues en France (réf.1.)

- Radar, méthode essayée par divers confrères Américains ou Canadiens, pour "sonder" les premiers mètres du sol. On observe une très bonne pénétration dans certains terrains : détection d'un tronc d'arbre sous 4 mètres de tourbe, mais pas de pénétration du tout dans d'autres terrains.

- Mesure directe de la densité de digues ou de remblais, par gravimétrie (réf.2) :

G est directement lié à l'altitude ; schématiquement, si l'on dispose de 2 stations au niveau 0 (G1, G3) de part et d'autre, d'une au niveau + z (G2), on aura $\frac{G1 + G3}{2} - G2 = (30,86 - 4,18 \sigma) z$ d'où la densité σ , que l'on peut calculer dans l'hypothèse d'absence d'anomalies dans la fondation (sous le niveau 0). C'est le seul cas en gravimétrie où on mesure la valeur absolue de la densité. (fig. 2).

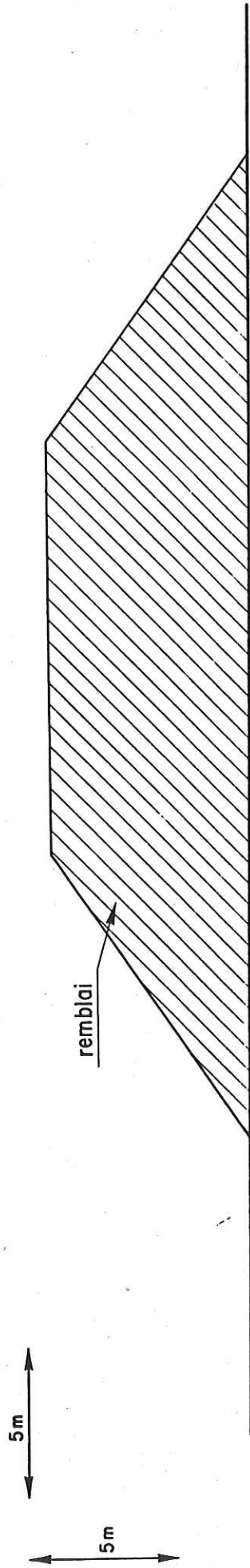
.../



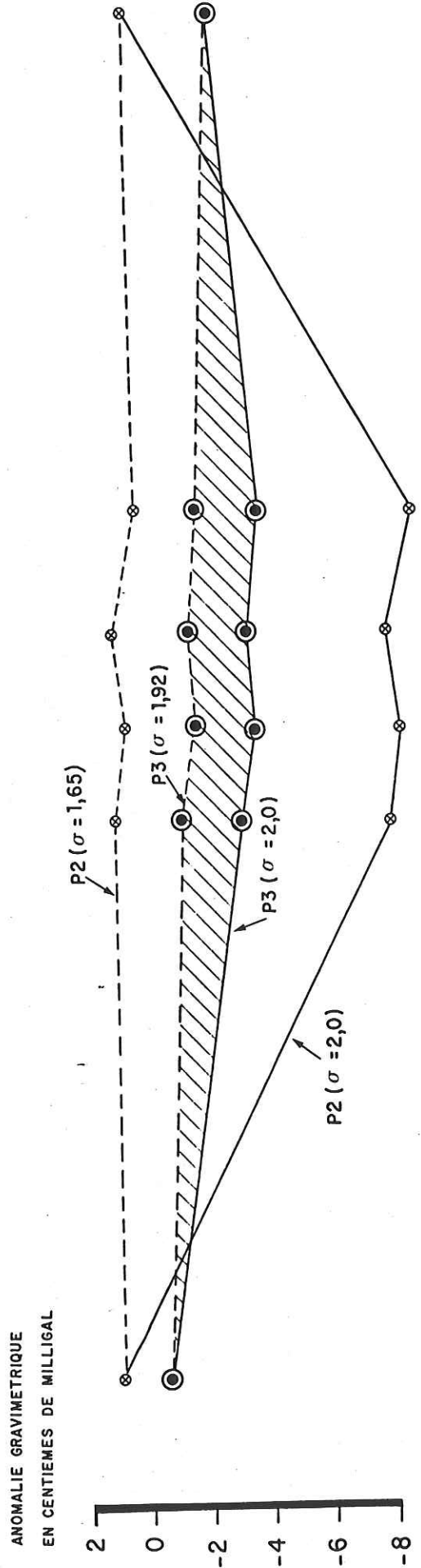
AUSCULTATION DES BERGES DU LAC DU SAUTET
 PAR MESURES ELECTRIQUES REPETEES

FIG. 1

Fig. 2



MESURE DE DENSITE D'UN REMLAI ANCIEN PAR MICROGRAVIMETRIE



I. 2 - Béton et pieux

L'auscultation géophysique du béton et particulièrement des pieux sont des opérations couramment pratiquées notamment par Sol-essais et par le C.E.B.T.P.

La méthode la plus sûre consiste à mettre en place au moment de l'exécution du pieu un tube PVC. Pour le contrôle, on descend dans le tube un ensemble émetteur-récepteur (tous deux des céramiques piezo électriques). On obtient un enregistrement continu sur lequel des défauts du pieu ressortent par des augmentations de temps de parcours, et surtout par une modification du caractère du signal (réf.3 et 4).

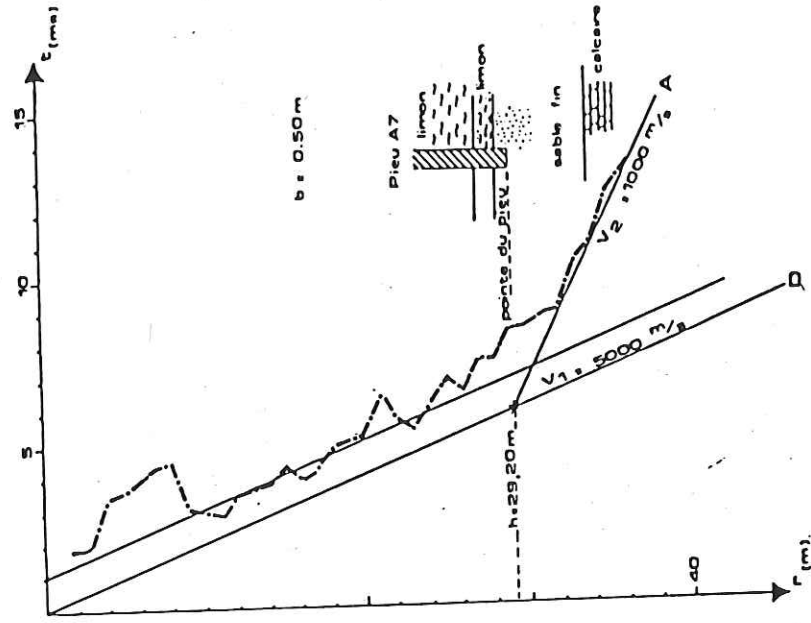
Lorsque ce PVC n'a pas été installé à l'avance on peut :

- pour 2 sondages distinctifs de part et d'autre du pieu et faire des mesures par transparence.
- exciter la tête du pieu par un vibreur et étudier les phénomènes de résonance (ref.5)
- Forer un seul sondage latéral et frapper l'ouvrage au marteau à proximité de la tête du pieu (méthode "microsismique transparence MST" de J. HURTADO et L. PAREZ, réf. 6, fig. 3).

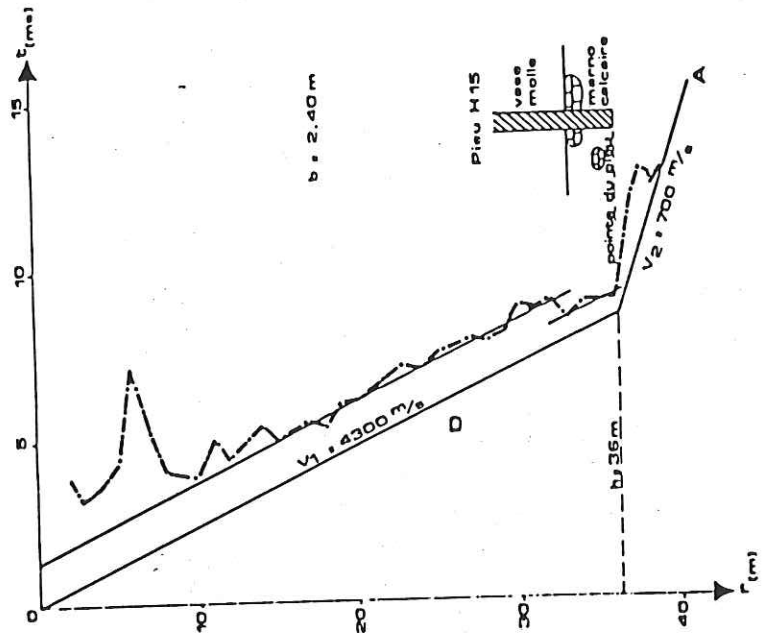
On utilise en réalité l'ensemble du pieu comme émetteur, le rayon sismique suit le pieu et sort à l'angle de réfraction totale, pour atteindre un capteur dans le forage. Pour contrôler la longueur du pieu, il est indispensable que le forage dépasse largement la base théorique du pieu. Le graphique temps - distance présente alors une brisure caractéristique au niveau de la base du pieu. Cette méthode a le grand avantage de pouvoir être utilisée même lorsque l'ouvrage fondé sur les pieux litigieux est construit, tout en ne nécessitant qu'un seul forage.

.../

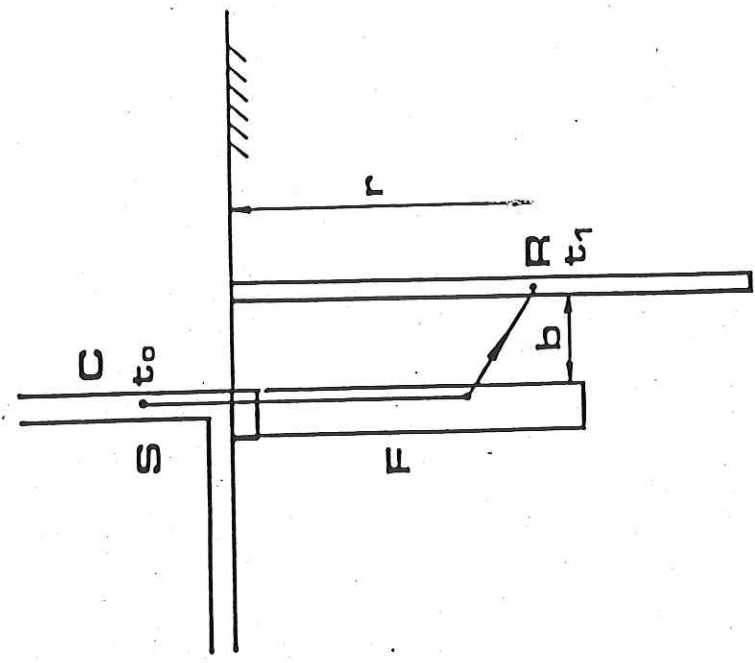
MICRO SISMIQUE TRANSPARENCE (M.S.T)



2ème exemple d'application



1er exemple d'application



Principe de la mesure

Fig. 3

III. SURVEILLANCE D'OUVRAGES PAR MESURES REPETEES

II.1. Gravimétrie

Les gravimètres modernes de haute sensibilité permettent la mesure :

- du microgal (10⁻⁹g) avec le Lacoste et Romberg modèle D portable.

- du nanogal (10⁻¹²g) avec le gravimètre à supra-conducteur de l'université de Berkeley, malheureusement difficilement transportable sur le terrain.

Les gravimètres peuvent être employés en auscultation de deux façons différentes :

- comme altimètres, pour contrôler les variations éventuelles d'altitude de deux stations pouvant être situées à des grandes distances l'une de l'autre.

- comme gravimètres, avec calcul de l'anomalie gravimétrique (dite de Bouguer) après correction de l'altitude.

L'utilisation du gravimètre comme altimètre, pour le contrôle de mouvements verticaux, éventuels de la croûte terrestre, a été employé par un confrère Californien, John Fett, pour la prévision des séismes. Plutôt que de faire de longs profils topographiques couvrant tout l'état de Californie, il a établi un réseau de plusieurs centaines de bases gravimétriques, pouvant être espacés de 100m (de part et d'autre de la faille de San Andreas), mais plus généralement de quelques dizaines de kilomètres. Pendant plusieurs années, les mesures ont été répétées tous les mois.

La précision à la lecture du gravimètre Lacoste et Romberg modèle D, est du microgal. L'écart type sur points repris est de l'ordre de 10 microgals ; il peut-être ramené à quelques microgals avec des mesures particulièrement soignées, et avec des mesures répétées sur plots de béton.

.../

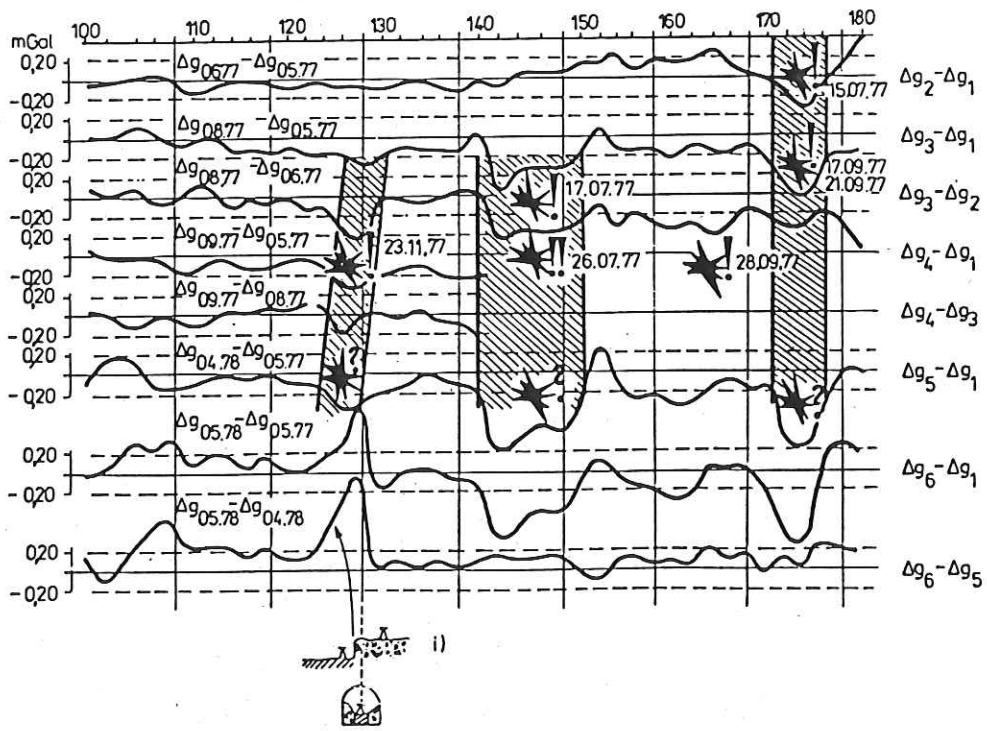
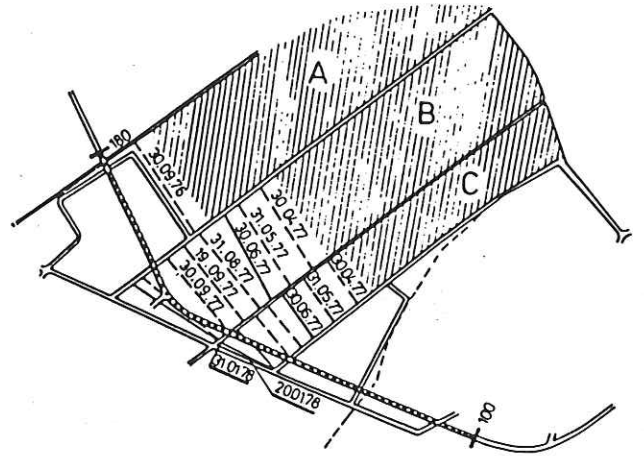
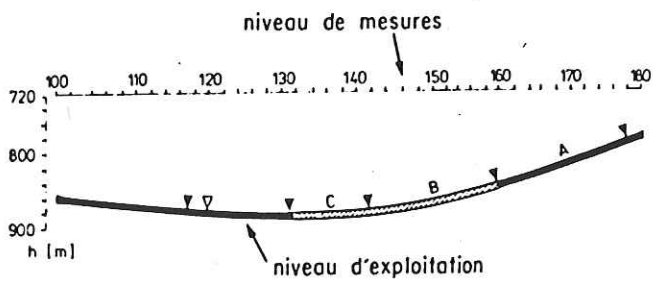


Fig. 4

Un microgal équivaut à 4,5 millimètres, 10 microgals à 4,5 centimètres.

Les mesures gravimétriques répétées peuvent aussi être employées pour le contrôle de déplacements de masses proches. Je citerai deux exemples :

- des mesures répétées à un an d'intervalle pour le contrôle de remontées de fontis (cavités de dissolution) en région Parisienne.

- des mesures répétées en mine de charbon, réalisées en Pologne par M.Z.Fajkiewicz, professeur à Cracovie (réf.7).

Le long d'une galerie située à l'aplomb d'une zone en exploitation, des mesures sont répétées mensuellement et même plus fréquemment en cas d'apparition d'anomalies. Des baisses de 0,20 milligals en quelques mois ont pu être constatées sur des tronçons de 30-40m. A plusieurs reprises les mesures ont conduit à ordonner l'évacuation de la taille, ce qui a dans un cas, permis d'éviter une catastrophe très grave.

On peut penser que la variation de g constatée est ici liée au déplacement très faible de masses rocheuses très importantes (fig. 4).

Enfin la gravimétrie répétée peut être employée pour le contrôle d'injections sur des grandes surfaces, tel que le remplissage des vides (fig. 5).

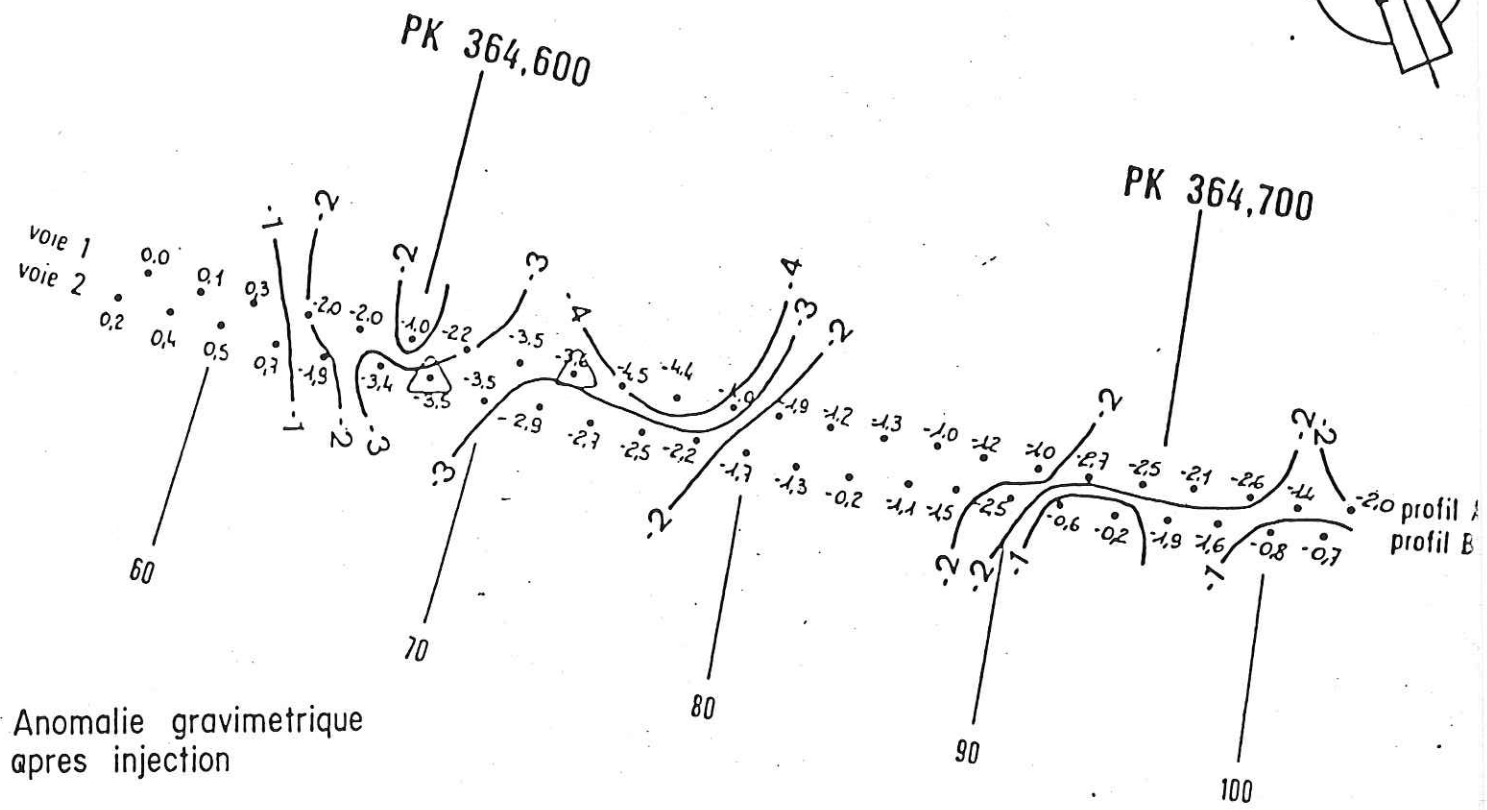
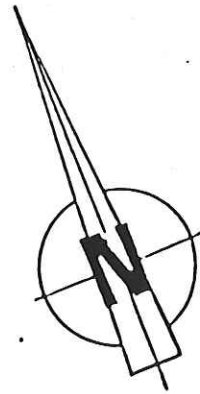
Mesures sismiques répétées (réf. 8, 9, 10)

On peut installer sous un ouvrage un ensemble de capteurs sismiques géophones et à partir de points d'émissions fixes, répéter des expériences en fonction de :

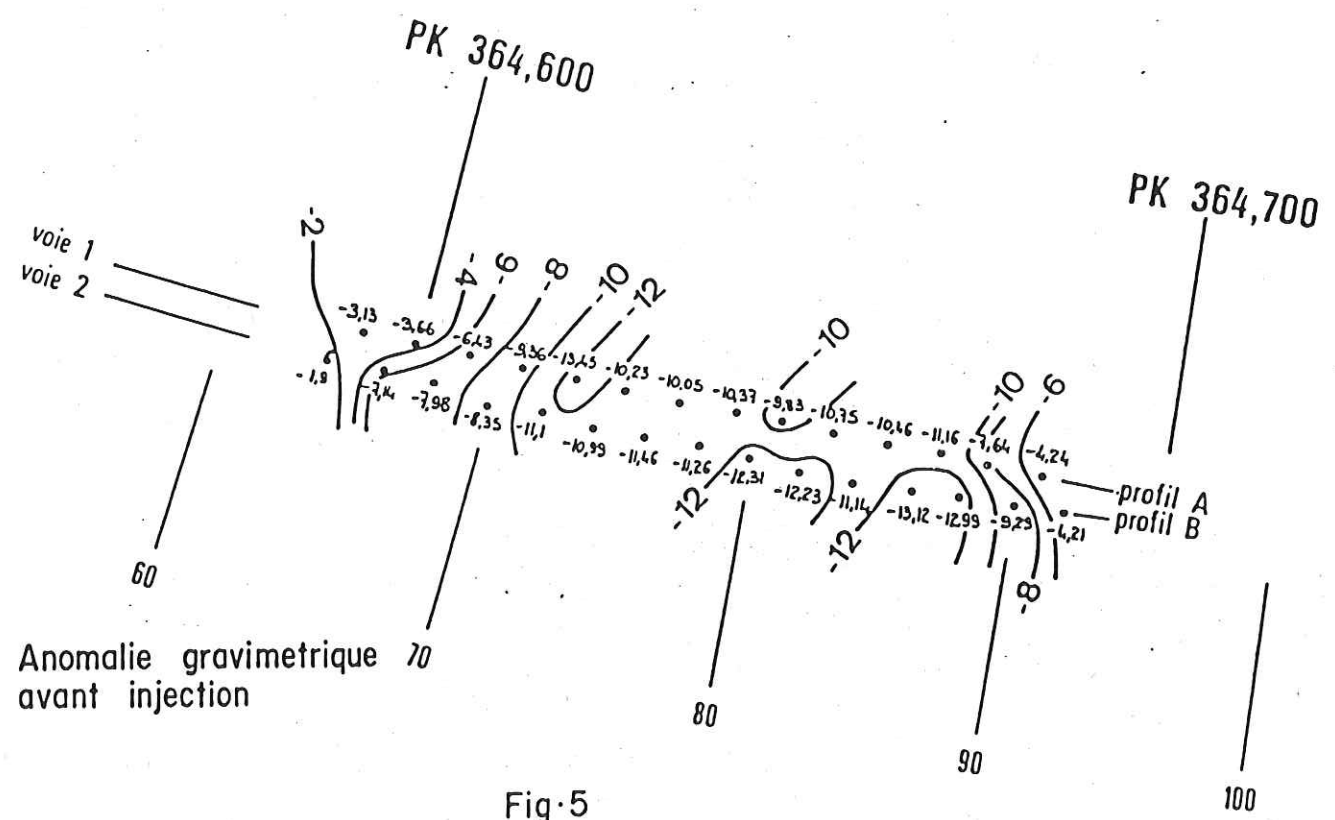
- la construction d'un barrage (réf. 8,9,10)
- le creusement d'une excavation souterraine (réf.10)
- la réalisation d'une campagne d'injections (réf.12)
- du compactage dynamique du sol.

Les mesures pourront comprendre :

.../



Anomalie gravimetrique
apres injection



Anomalie gravimetrique
avant injection

Fig. 5

- les vitesses de compression
- les vitesses des ondes de cisaillement
- l'atténuation
- atténuation en fonction du spectre de fréquences.

L'exemple présenté ici concerne le barrage du Gage (Ardèche) (réf.10) où on a ausculté le rocher de fondation pendant la mise en eau puis pendant plusieurs cycles de remplissage vidange s'étalant sur près de 5 ans.

On a montré l'intérêt de l'analyse de la forme du signal reçu et de son caractère. On voit que la zone à paramètres sismiques "amélioré" s'étend dans la zone comprimée sous l'ouvrage, verticalement et aussi obliquement le long du voile d'injection (fig. 6, 7, 8).

L'observation du module moyen au cours des 11 séries, de mesures montre "l'écrouissage" général du rocher indépendamment du remplissage ou de la vidange, suivant une loi du type.

$$E(t) = 20.200 (1+0,218 \log t) - E \text{ en MPa, } t \text{ en jours}$$

Mesures électriques répétées

L'exemple suivant est dû à l'amabilité de mon confrère M.F. Bollo, et de son Maître d'Ouvrage, M.R. CORDA du Ministère de l'Agriculture (réf.12) Au barrage de Kruth (Alsace); ils ont installé un dispositif permanent d'électrodes concernant tant la digue que les fondations et les appuis. Des mesures de résistivité répétées ont permis de mettre en évidence certaines zones perméables (fig. 9).

Mesures géotechniques in situ répétées

Depuis une vingtaine d'années, on a tenté de contrôler par des mesures directes in situ, la variation de la qualité du rocher en fonction des injections ou de la construction d'ouvrages. On a pu ainsi répéter les mesures suivantes :

CAPTEUR "0"

Constance de la forme des signaux à diverses époques

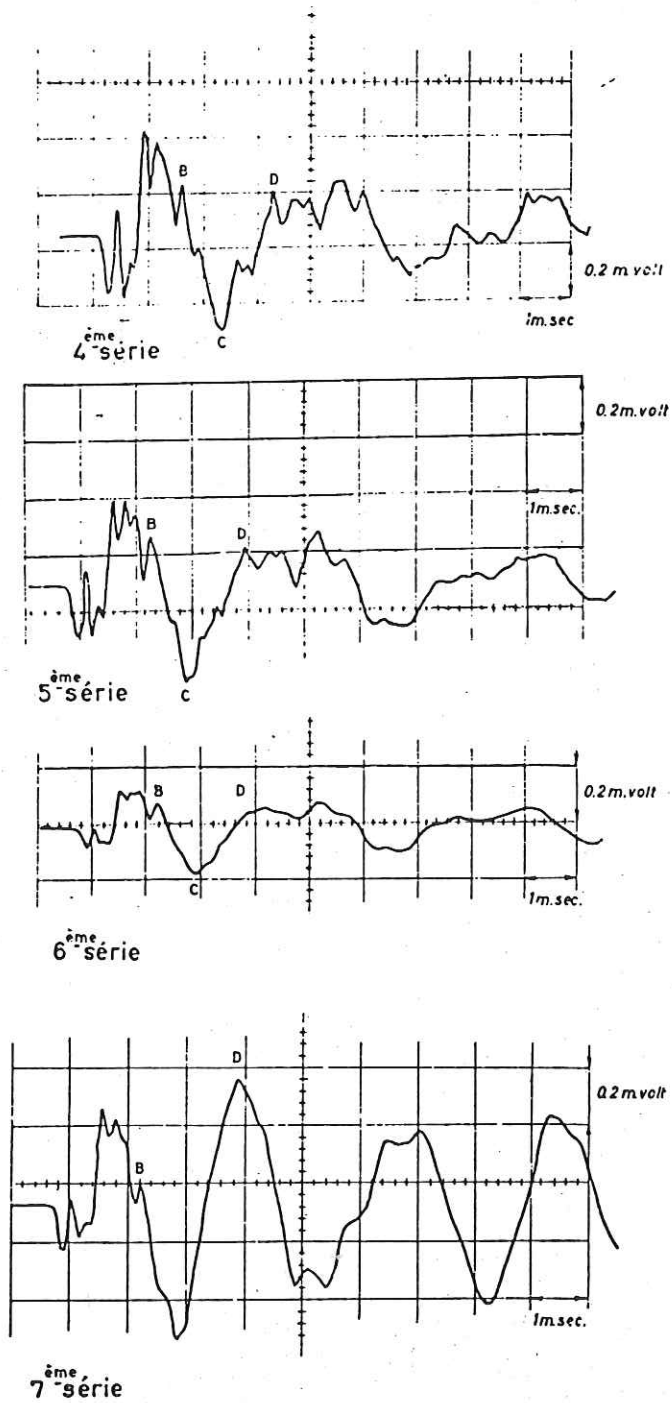


Fig. 6

BARRAGE DU GAGE - VARIATION DE SIGNAUX SISMQUES
EN FONCTION DU NIVEAU DE REMPLISSAGE

- essais de chargement en galerie au vérin à plaque de charge (barrage de ST. CASSIEN) (réf. 11, fig. 10).

- essais au pressiomètre Ménard, au pénétromètre ainsi qu'au gamma-densimètre pour le contrôle de la qualité de sols très mous avant et après compactage dynamique (réf.13 et 14, fig. 11 et 12)

- mesures de paramètres de forage (vitesse d'avancement, percussion réfléchie, pression de fluide d'injection) avant et après injection (réf.15)

Pour le compactage dynamique, méthode créée par L. Ménard dont le flambeau a été repris par P-M. BIC et J-M. COGNON, le contrôle avant, pendant et après fait partie intégrante du procédé.

Le premier exemple présenté montre l'évolution des densités γ_h et γ_d en fonction du compactage d'un sol sableux.

Le deuxième, réalisé sur un remblai de sable de Fontainebleau, montre le contrôle de l'amélioration des propriétés mécaniques avant et après compactage :

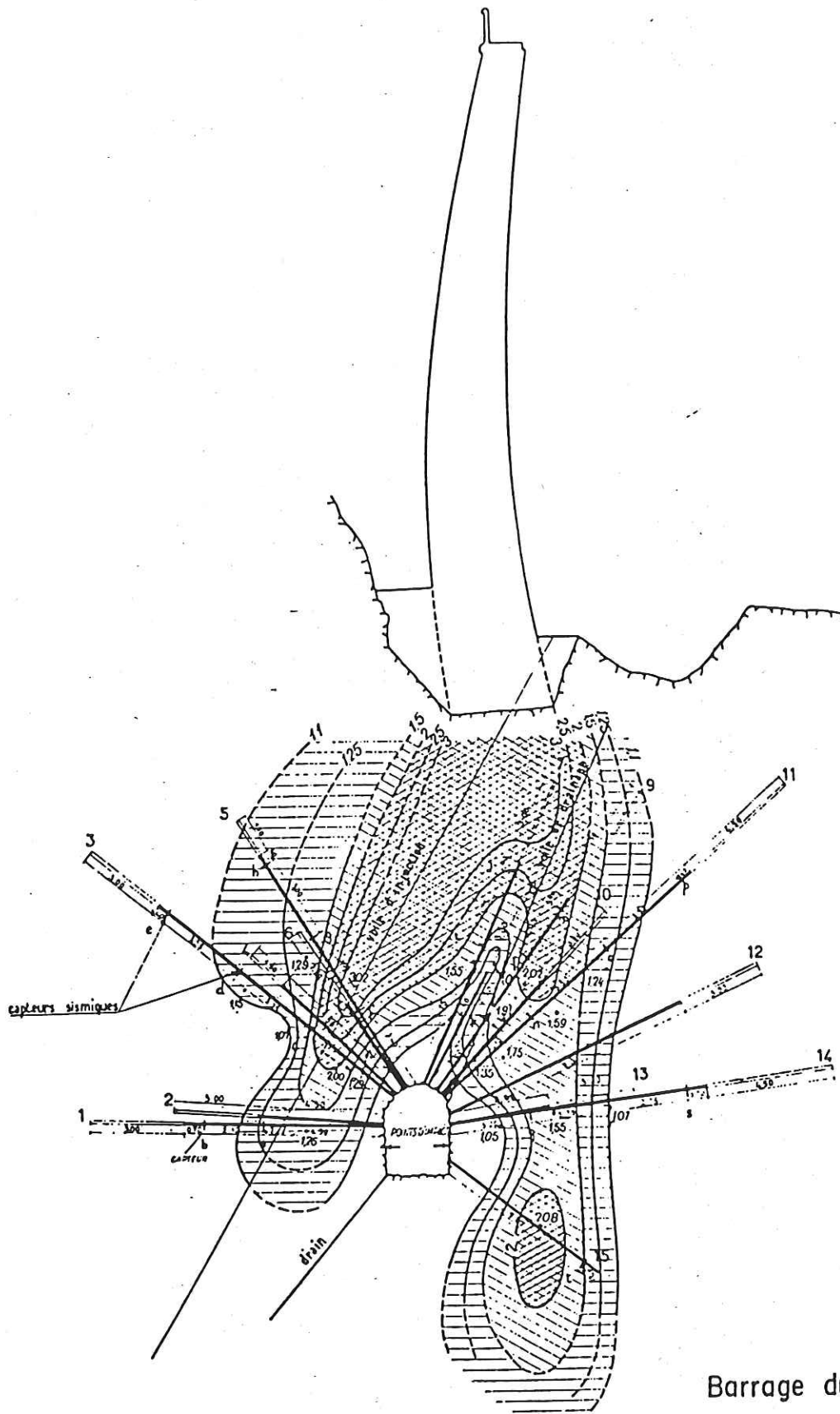
RP : de 10-20 bars à 50-200 bars

PL : de 5 à 15-25 bars

E : de 30 à 150-500 bars

γ_d : de 1,4-1,65 à 1,65-1,75 gm /cm³

La figure 13 concerne des forages avec enregistrement de vitesse d'avancement réalisé avant et après comblement de carrières souterraines effondrées, par injection.



Barrage du Gage
 Carte de variation d'amplitude sismique

Fig. 7

BARRAGE GAGE II
 Evolution du module
 d'élasticité en fonction
 du temps

E (Mpa)

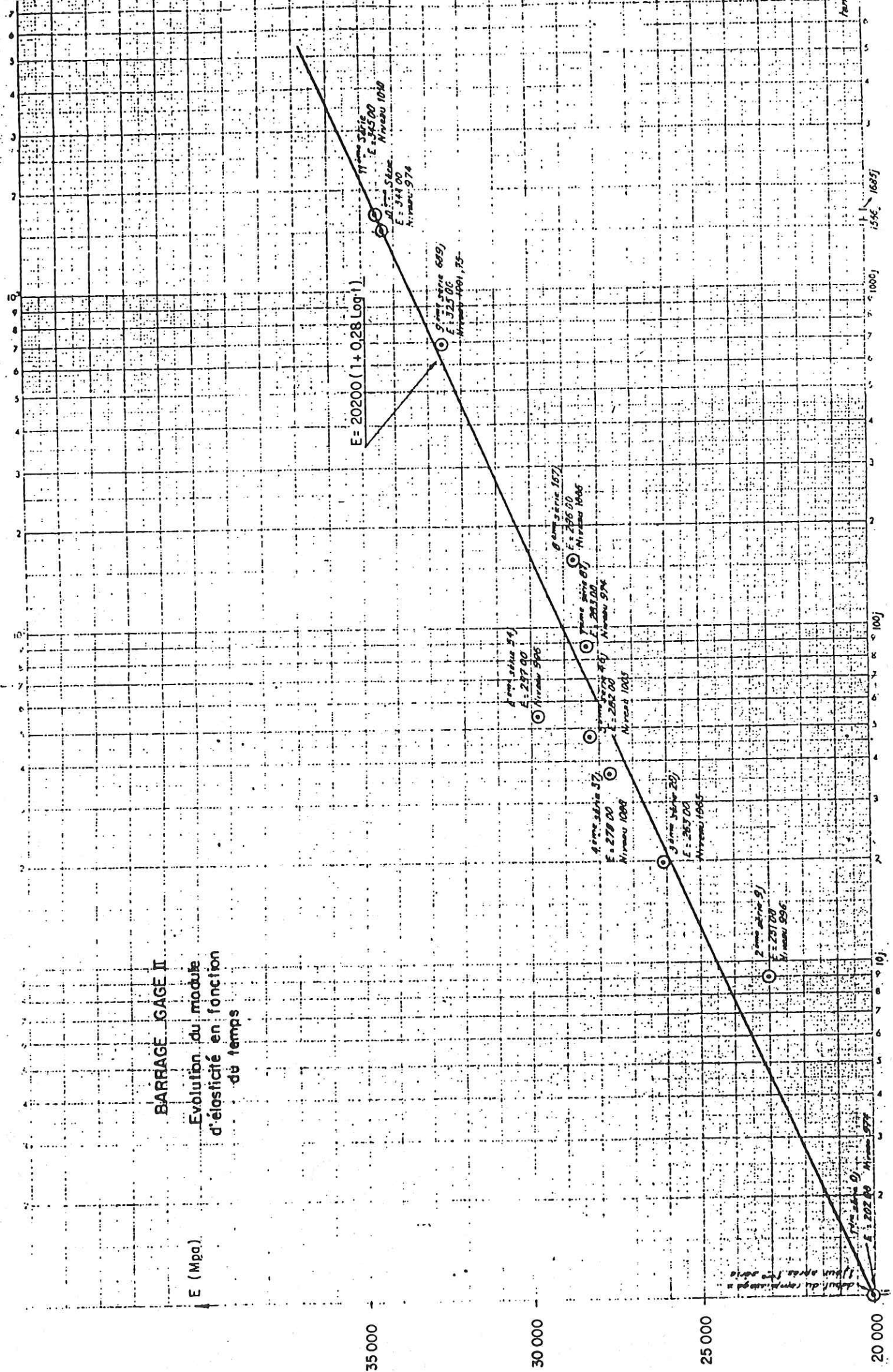


Fig. 8

Barrage de Kruth-wildenstein auscultation électrique du rocher
de fondation avant construction

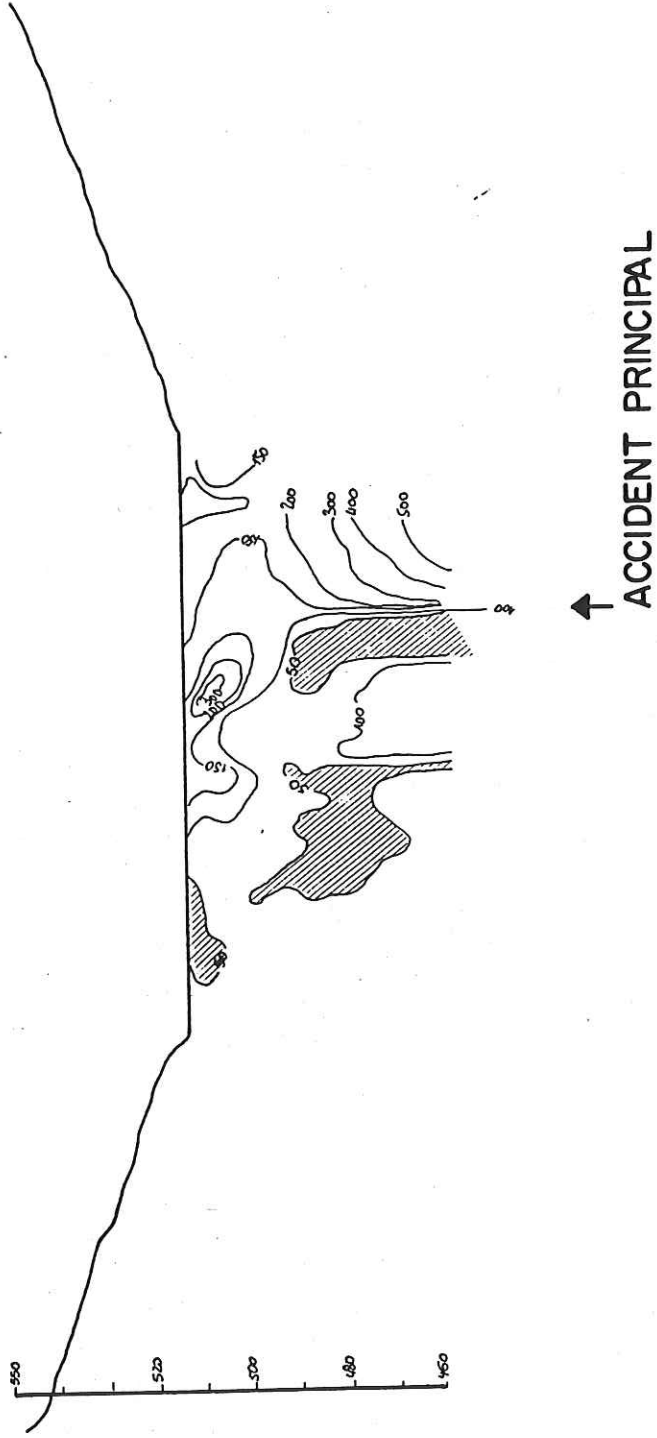


FIG.9

BARRAGE DE ST. CASSIEN (EDF)

essais au verin

Pression (Mpa)

10,0

5,0

0

← apres injection

← avant injection

500

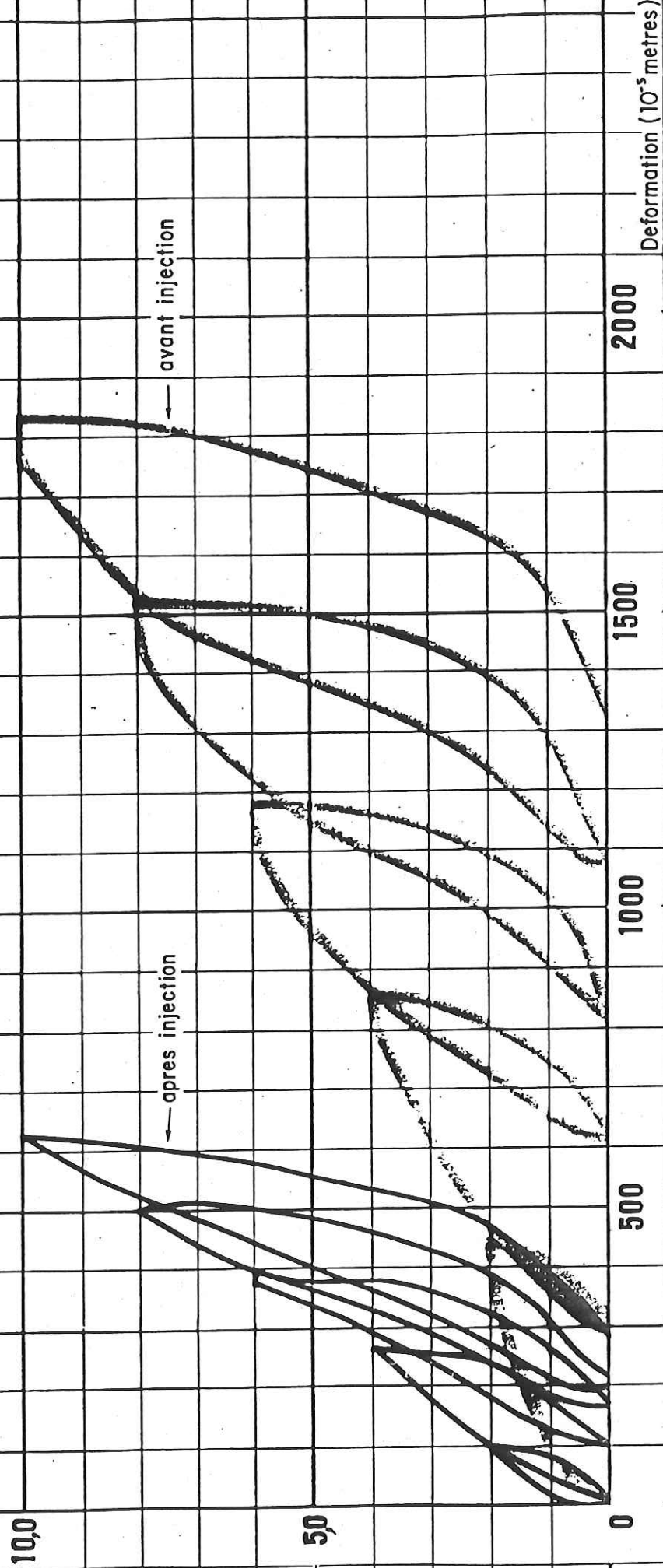
1000

1500

2000

Deformation (10^{-5} metres)

Fig. 10



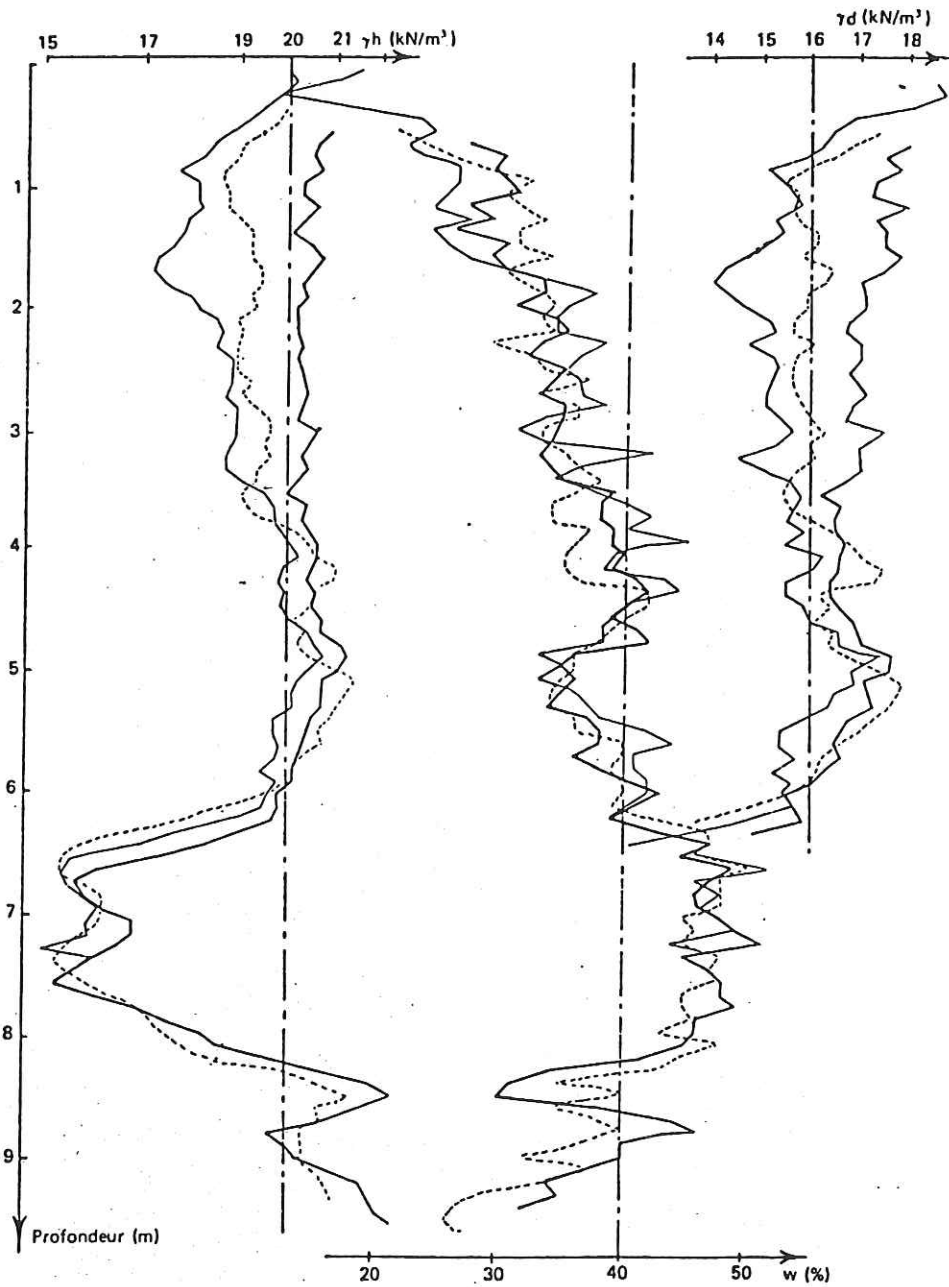
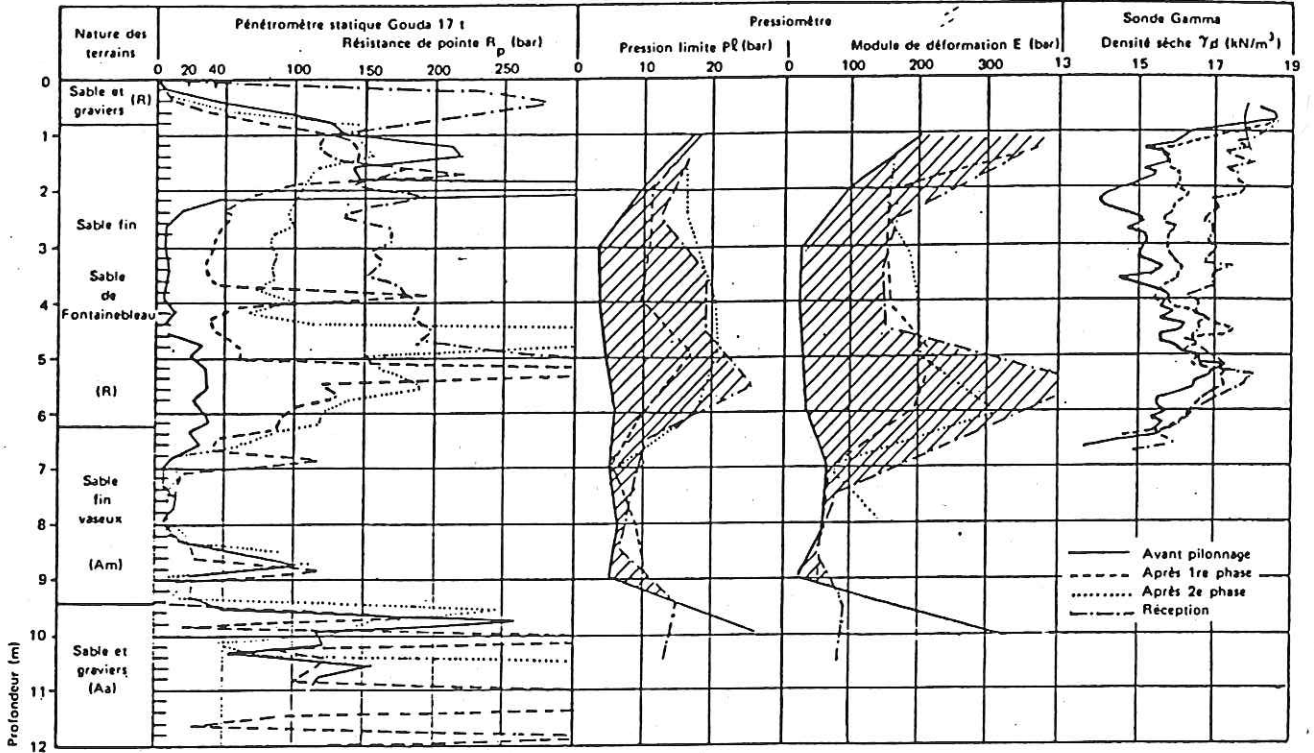


Fig. 11

Enregistrements des poids spécifiques humides γ_h par sonde gamma-gamma et de la teneur en eau w par sonde neutron-neutron. Courbes de poids spécifique sec γ_d déduites de ces deux mesures.

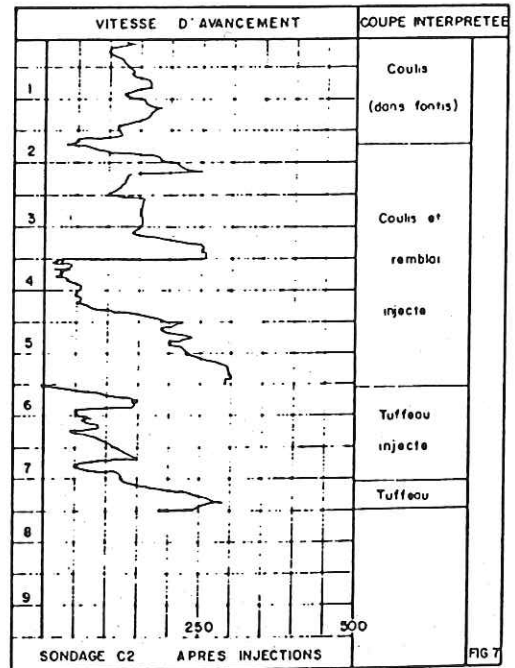
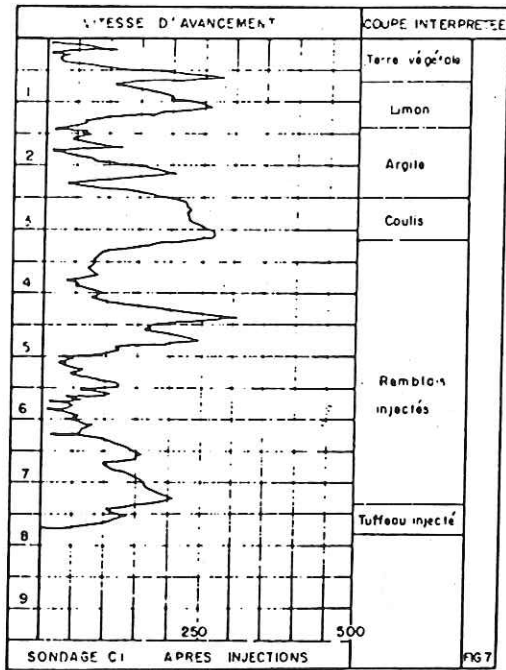
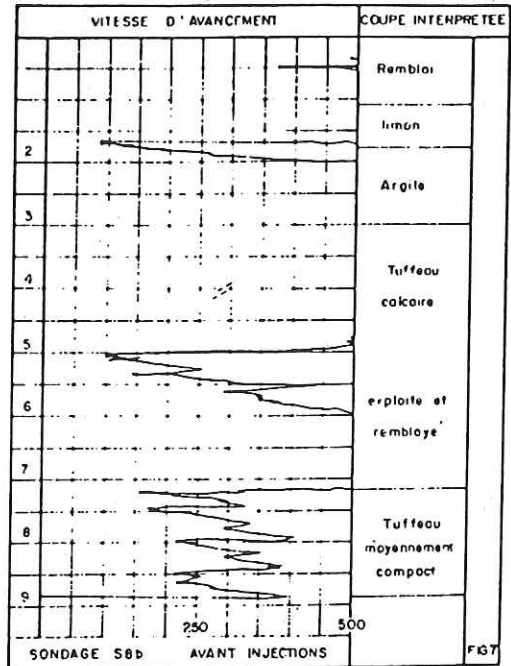
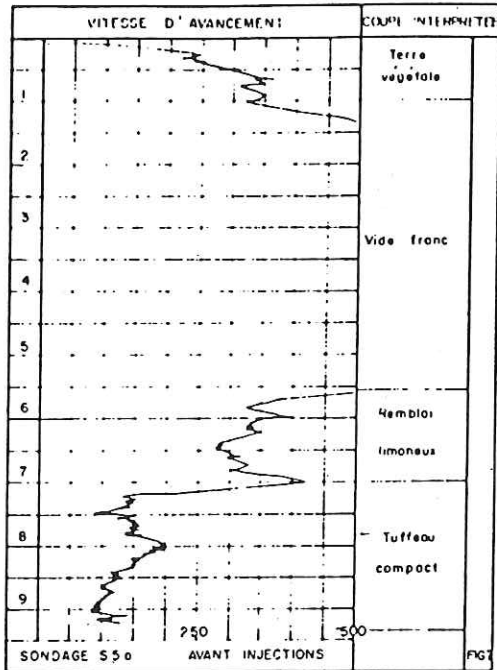
- avant pilonnage
- - - après première phase de pilonnage
- après troisième phase de pilonnage.

Sondages P3 et F3 Z:25,98 NGF



Site d'essai n° 2. Remblai en sable de Beauchamp.

Fig. 12



CONCLUSION

J'ai essayé de passer en revue l'application de diverses méthodes géophysiques, mais aussi de mesures géotechniques in situ, à l'auscultation d'ouvrages ou de leur fondation. Pour la plupart, elles sont réservées à des ouvrages exceptionnels, ou encore pour certaines, elles sont encore au stade expérimental. Nous retiendrons 2 ensembles de techniques entrées dans le domaine industriel :

- l'auscultation du béton et plus particulièrement de pieux, par mesures microsismiques ou soniques
- le contrôle de l'amélioration des sols avant et après compactage dynamique, par pressiomètres ou par pénétromètres.

oOo

BIBLIOGRAPHIE

- 1) A.A. OGILVY, M.A. AYED et V.A. BOGOSLOVSKY
Geophysical studies of water leakages from reservoirs, Geophysical Prospecting, mars 1969
- 2) J. LAKSHMANAN
Mesure directe de la densité de remblais par gravimétrie,
Congrès de l'Association européenne de Géophysiciens (E.A.E.G.),
Cannes, mai 1982
- 3) J. PAQUET
Contrôle des pieux par carottage sonique, annales de l'ITBTP, octobre 1969
- 4) J. PAQUET
Etude vibratoire des pieux en béton, réponse harmonique et impulsionnelle,
Annales de l'ITBTP, mai 1968
- 5) J. PAQUET
Contrôle non destructif des pieux en béton, carottage sismique et méthode
de l'impulsion mécanique, Annales de l'ITBTP, mars 1976
- 6) J. HURTADO
Mesure de la profondeur des fondations par micro sismique transparence
Revue Française de Géotechnique, n° 6, février 1979
- 7) Z. FAJLKLEWIEZ
Neue Perspektiven der Mikrogravimetrie - Teil der Gebirgsschlagprognose
(Neue Bergbautechnik, 12 Jg, Heft 3, mars 1982)
- 8) M. TERRASSA, P. DUFFAUT, J.C. GARNIER, M.F. BOLLO
Auscultation sismique du radier de fondation du barrage du Roujanel
(1er congrès International de Mécanique des Roches, LISBONNE 1966,
rapport 8-19)
- 9) G. FAUROUX, J.C. GARNIER, J. LAKSHMANAN
Observation des variations de contrainte dans le rocher de fondation
du barrage du GAGE II par auscultation dynamique (Symposium International
de Mécanique des Roches, MADRID, 1969)
- 10) GROUPE DE TRAVAIL FRANCAIS animé par P. DUFFAUT
Quelques développements récents des moyens d'auscultation du massif rocheux
(10ème Congrès des Grands Barrages, MONTREAL 1970)

11) GROUPE DE TRAVAIL FRANCAIS

Mesure des qualités mécaniques des massifs rocheux après consolidation par injection, Q.28, R. 18, 8ème Congrès des Grands Barrages, EDIMBOURG 1964

12) M.F. BOLLO, R. CORDA

Les bases physiques de l'auscultation des mouvements des eaux souterraines à l'aide d'électrodes inaltérables, Terres et Eaux, n° 57, 1968

13) J.M. COGNON, Tri postal d'Angers

Compactage dynamique, Revue Travaux, mars 1981

14) J.P. GIGAN

Compactage par pilonnage intensif de remblais de comblement d'un bras de Seine, Bulletin Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, juillet-août 1977

15) J.C. ERLING, J. LAKSHMANAN, J. ROUGE

Apport des diagraphies pour la réalisation d'injections de carrières effondrées, Journées Nationales Géotechniques, NANTES, mars 1981