

Prévention des risques technologiques, l'auscultation

par Jean COMBE et Gérard CHAZALET, Electricité de France

Résumé

L'auscultation est un ensemble de techniques permettant de s'assurer constamment du bon comportement des ouvrages d'art et du sol qui les supporte. A ce titre elle est un des moyens de prévention des risques technologiques majeurs.

L'auscultation utilise diverses techniques visuelles,

mécaniques, électriques ou électroniques : la topographie y apporte une excellente connaissance des déplacements et déformations des ouvrages, associée à la rigueur et la précision des mesures ; elle figure presque toujours dans le dispositif d'auscultation.

Les auteurs se proposent de développer ces divers aspects, en prenant des exemples dans l'ensemble des ouvrages construits par Electricité de France.

Notre colloque a pour thème aujourd'hui la topographie dans la prévention des risques naturels et technologiques majeurs. On a jusqu'ici beaucoup évoqué les risques naturels. Notre intervention portera sur les risques technologiques dans un cadre un peu restreint, qui est celui de nos travaux quotidiens, en évoquant les diverses méthodes d'auscultation qui constituent très souvent une réponse aux questions posées.

I. Généralités

Les risques technologiques sont inhérents à toute activité de l'ingénieur. Construire un pont ou un barrage, c'est défier l'ordre normal de la nature ; creuser une route à flanc de coteau ou percer une galerie ne se fait pas sans bouleverser l'équilibre naturel du terrain. Que dire alors d'installation telle que les centrales nucléaires où en plus la contamination radioactive n'est pas absente. Dans tous les cas, les ingénieurs qui conçoivent le projet prennent en compte tous les éléments nécessaires (géologie, topographie du site, résistance des matériaux et des sols, étude de béton, de mécanique...) et de bons coefficients de sécurité qui assurent encore leurs calculs. Alors comment se fait-il que des risques demeurent ? car il en demeure ! On voit encore des barrages se rompre, des ponts se fissurer, voire s'écrouler, etc...

L'analyse des faits montre que bien souvent c'est un détail oublié, ou une modification brutale de conditions naturelles qui entraîne la ruine d'un ouvrage. Coyne disait "quand j'étudie un barrage, je suis sûr du béton mais jamais du sol qui le supporte". Il a suffi parfois d'une venue d'eau, ou, à l'inverse, d'une sécheresse, ou d'un élément géologique minime non pris en compte pour provoquer la catastrophe.

Ces risques sont d'abord pour les populations, c'est bien évident. Pensons à Fréjus en 1959, 300 morts à la suite de la rupture de Malpasset. Mais ces risques sont aussi financiers, par exemple, une tour de réfrigération qui s'écroule, ou encore l'écroulement du pont de Tours le 9/4/1978 entraînant la nécessité de construire 2 ponts Bailey et bloquant la circulation pendant 5 ans.

II. L'auscultation

Contre ces risques, une solution a été depuis longtemps envisagée, c'est l'auscultation, c'est-à-dire la comparaison constante de la réalité avec les quantités prévues par les calculs. Par exemple, un barrage n'est jamais totalement étanche ; il y a des fuites que l'on suit attentivement et surtout leur variation ; de même un barrage en béton se déformera lentement sous la poussée de

l'eau. Ceci aussi est prévu au calcul et on vérifie qu'il n'y a pas d'écart entre la réalité et les calculs.

Des considérations générales concernant l'auscultation peuvent être résumées comme suit :

II.1 Quand ausculter ?

Il faut à notre avis distinguer 4 périodes essentielles dans l'étude et la réalisation d'un ouvrage pour lesquels les dispositifs de mesures et d'auscultation ne sont pas forcément identiques.

II.1.1 *Avant la construction*, il faut s'assurer que le sol qui va recevoir l'ouvrage ne subit pas déjà des mouvements naturels. Divers dispositifs sont possibles, mais ils doivent demeurer simples, adaptés au mieux à l'idée que l'on a du phénomène à mesurer.

II.1.2 *Pendant la construction*, le fait même de construire modifie déjà le site, les fouilles, le poids propre de l'ouvrage entraîne déjà des modifications et déformations du sol.

Là, le dispositif doit surtout être robuste, bien protégé car il faut qu'il résiste aux agressions causées par le déroulement du chantier.

II.1.3 *A l'essai de l'ouvrage*, c'est bien évident qu'il faut essayer un ouvrage avant de le remettre au grand public. Par exemple, un pont nouveau n'est autorisé à la circulation que lorsque des essais de charge (gros camions remplis de gravier) sont effectués.

Ici on aura besoin d'un dispositif léger qui ne servira qu'une fois, mais qui doit être parfaitement fiable.

II.1.4 *Pendant la vie de l'ouvrage*, on aurait tendance à croire que puisque l'ouvrage a été essayé et qui a donné satisfaction, on n'a plus de raison de s'inquiéter et qu'il vivra tranquillement pendant des années, voire des siècles. Faux. Il se dégrade doucement, lentement et sûrement, d'où la nécessité d'un dispositif d'auscultation pérenne, parfaitement reproductible, pouvant durer plusieurs années et de visites périodiques (car rien ne remplace l'œil humain).

II.2 Dans quel esprit ausculter ?

Tout d'abord, il faut être conscient que l'auscultation ne peut être un travail de routine ; il faut constamment être en éveil. Certaines règles générales s'imposent :

— nécessité d'une compétence et d'une conscience professionnelle à toute épreuve ;

— vérification permanente de chaque donnée ou de chaque mesure : on ne peut imaginer un topographe rentrant au bureau sans avoir vérifié la fermeture d'un cheminement ou d'un tour d'horizon ;

— surabondance des mesures. Tout doit être fait deux fois systématiquement : on verra aussi que cela est important dans les calculs ;

— nécessité du recoupement avec d'autres méthodes, les déformations observées par exemple par géodésie, doivent se vérifier par des mesures au pendule, à l'inclinomètre, voire à l'extensomètre...

II.3 Comment installer un système d'auscultation ?

Les exemples sont volontairement limités à la topographie. Encore des généralités mais utiles.

— Le système doit être simple. L'expérience montre que des appareillages compliqués, dont on ne connaît pas le comportement à long terme sont à rejeter. Ceci ne semble pas militer en faveur de techniques nouvelles mais il faut avoir le courage d'installer un système nouveau en parallèle à un ancien, et de le tester longtemps.

— Le système doit être fiable. Ceci est très important, en effet pour pouvoir suivre avec précision l'évolution ou la stabilité d'un ouvrage, il est impératif que les mêmes mesures soient faites. Donc il est quasiment impossible de changer de système en cours de route ce qui implique pérennité et fiabilité de tout le dispositif. Il en résulte qu'aujourd'hui, on ausculte encore des ouvrages avec des méthodes de 1960 et que les dernières techniques ne sont pas forcément employées.

III. Méthode d'auscultation

Ce vocable qui relève de la médecine a été utilisé pour la première fois par J. Coyne. En fait, il est assez exact puisque comme un médecin on observe un objet de façon à établir un diagnostic, voire à prescrire des remèdes.

Il existe de nombreux textes concernant l'auscultation, notamment, pour les barrages, avec des règlements assez précis pour prévenir les populations civiles en cas de danger... Ils ont été déjà évoqués par Maurice Dauge dans son exposé à Tours en 1978.

On sait aussi que l'analyse des résultats d'une auscultation, même si rien ne se passe, est riche d'enseignements pour les générations futures. C'est pourquoi il convient de conserver tous les résultats de ces travaux et d'équiper systématiquement tous les ouvrages d'un dispositif dès lors que quelque risque de mouvement ou de déformation peut être envisagé.

A titre d'exemple, en ce qui concerne EDF sont auscultés :

— dans le domaine hydraulique, les barrages, les appuis, les carrières, les usines souterraines, les galeries et les ouvrages d'art (pont, tunnels, aqueducs, etc...) ;

— pour le nucléaire, les radiers d'ouvrages, le réacteur, le tube transfert, les tables de groupe turbo-alternateur, les réfrigérants, etc...

Chacun de ces ouvrages comporte un système approprié et il serait fastidieux et impossible de les décrire tous dans le temps qui nous est imparti.

Cependant, la topographie y occupe une place très importante notamment avec trois techniques essentielles, le nivellement, la géodésie, la photogrammétrie. Rappelons brièvement les autres techniques qui complètent ou corroborent les résultats topographiques.

III.1 Inspection visuelle, fondamentale dans la mesure où elle est réalisée par un spécialiste, elle permet de détecter les fissures, éclats du béton, suintement, résurgence, tâche de rouille due à l'oxydation des aciers, etc... et conduire à des mesures de confirmation (alcali-réaction-p.e.).

III.2 Mesure des débits de fuite pour les ouvrages hydrauliques. Nous avons déjà évoqué cette question dans l'introduction. Il existe divers matériels plus ou moins sim-

ples depuis le seau et le chronomètre, jusqu'à l'enregistrement automatique et la télétransmission.

III.3 Suivi de la nappe phréatique

Il s'agit de mesures de niveau d'eau dans une série de piézomètres disposés judicieusement autour de l'ouvrage et de voir les variations de la nappe phréatique en fonction de la pluviométrie, d'où une analyse pouvant conduire à la détection d'anomalie. Pour les centrales nucléaires, la mesure de la hauteur se double d'une analyse de l'eau des piézomètres. S'il s'avérait que la teneur en un produit quelconque soit supérieure au taux prévu, cela signifierait qu'il y a une fuite dans le circuit d'eau, dans la partie vive de l'installation (piscine p.e.) et éventuellement dans le béton.

III.4 Mesure de pression

Une foule de systèmes existe, qui mesurent la pression interstitielle ou la pression totale dans les barrages en enrochement ou les grands talus. Là aussi toute variation significative est repérée (fig. 1).

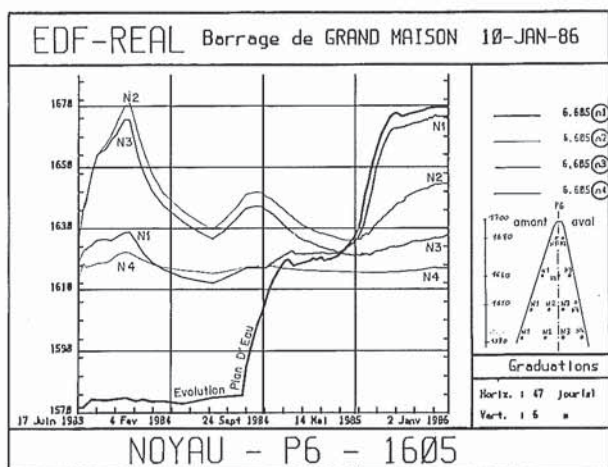


Fig. 1 — Mesure des pressions internes à Grand-Maison

III.5 Inclinométrie (fig. 2)

On imagine l'impact que peut provoquer une vague consécutive à l'éboulement d'une structure naturelle instable dans une retenue pleine. La mesure des déplacements

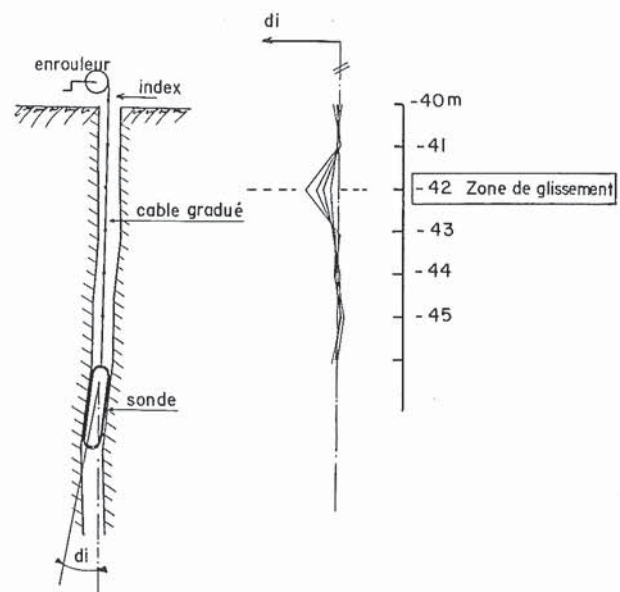


Fig. 2 — Inclinométrie dans un forage vertical tube

ments horizontaux par inclinométrie, à partir d'un forage vertical, détermine le cercle de glissement et permet d'évaluer la masse en rupture d'équilibre.

Un tube vertical, rainuré, scellé au terrain, guide une sonde équipée d'un servo-accéléromètre. La sonde mesure son inclinaison par rapport à la verticale.

L'inclinomètre est descendu dans le tube à l'aide d'un câble gradué en 1/2 mètre repérant ainsi le niveau de la mesure.

Deux mesures en opposition sont effectuées. L'angle d'inclinaison ainsi mesuré est corrigé de la demi-différence des valeurs lues pour un même niveau.

Résolution de l'appareil : 10^{-4}

Précision de la mesure : 10^{-3} (donnée constructeur)

III.6 Télécaptur de déplacement et canne de convergence

Ces deux appareillages, développés par le CETE de Lyon (Groupe Mécanique des Roches, Division "Laboratoires", du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipe-ment de Lyon), permettent notamment de suivre l'évolution relative des deux épontes d'une fracture dans un versant instable. Ces dispositifs sont habituellement complétés par un système d'auscultation géodésique lequel fournira l'indication des déplacements absolus en planimétrie et en altimétrie.

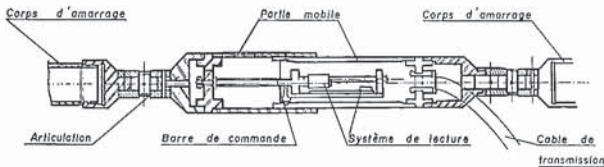


Fig. 3 — Coupe schématique d'un capteur TEDEP

III.6.1 Télécaptur de déplacement (TEDEP) (fig. 3)

Le principal intérêt de cet appareil est l'enregistrement en continu et à distance d'un mouvement unidirectionnel entre les deux épontes d'une fracture. L'information sur l'évolution du mouvement, par pointés permanents, est transmise par un câble à un terminal de mesure qui comprend essentiellement :

- un boîtier primaire permettant, si nécessaire, une exploitation manuelle autonome en cas de défaillance des enregistreurs. L'affichage des valeurs apparaît en code ;
- un boîtier décodeur-afficheur permettant la lecture directe des valeurs décodées, en pilotage manuel, et la lecture des numéros des TEDEP en pilotage automatique ;
- des enregistreurs "à pointés".

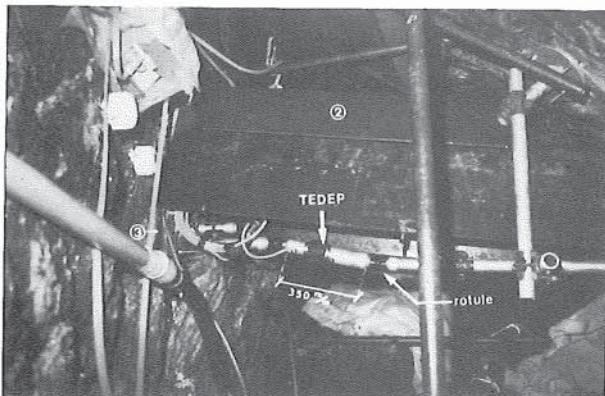


Fig. 4a — Vue d'un TEDEP (Télécaptur de déplacement)
2. Protection lourde, pour le TEDEP, vis-à-vis des chutes de blocs
3. Platine de fixation

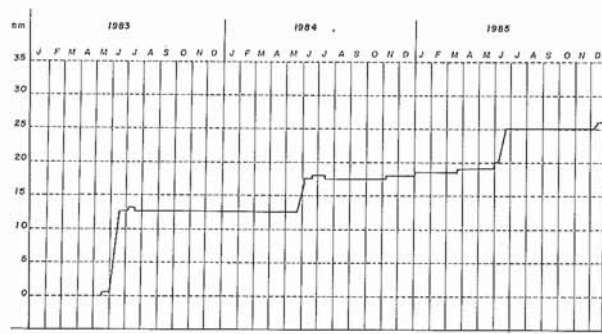


Fig. 4b — Auscultation carrière TEDEP n° 1

La course maximale du capteur est de 50 mm et sa précision de $\pm 0,25$ mm. Les platines de fixation doivent permettre de recalculer le TEDEP lorsque celui-ci arrive en fin de course.

III.6.2 Canne de convergence (fig. 5a et 5b)

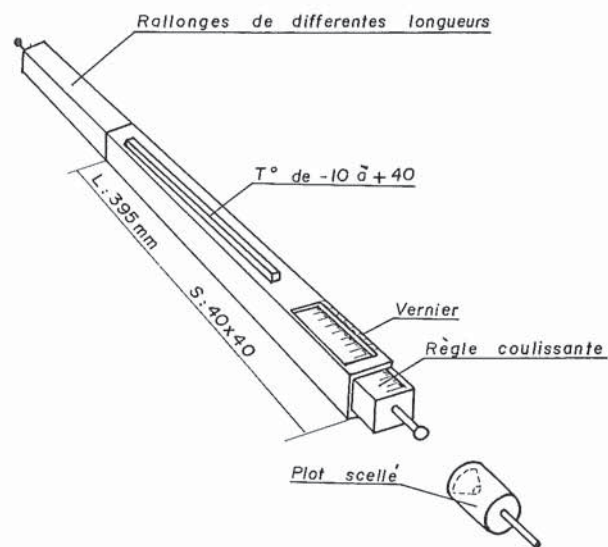


Fig. 5a — Schéma de la canne de convergence

Cet appareil est constitué d'un vernier porté par une canne très rigide, à laquelle on peut adjoindre différentes longueurs de rallonge. Il permet de mesurer avec une sensibilité de 1/10 mm l'entraxe de deux plots en bronze scellés dans les épontes de la fracture (fig. 5).



Fig. 5b — Mesure avec la canne de convergence (photographie)

En formant un repère de base constitué de trois plots sur une des épontes, on peut analyser tridimensionnellement le mouvement d'un autre plot situé sur l'éponte opposée par simple lecture des trois distances d_1 , d_2 ,

d3 ; la mesure des trois distances d1, d2, d3 permet de connaître la position du plot isolé par rapport à la base de mesure constituée par les 3 plots situés sur l'éponte opposée (fig. 6).

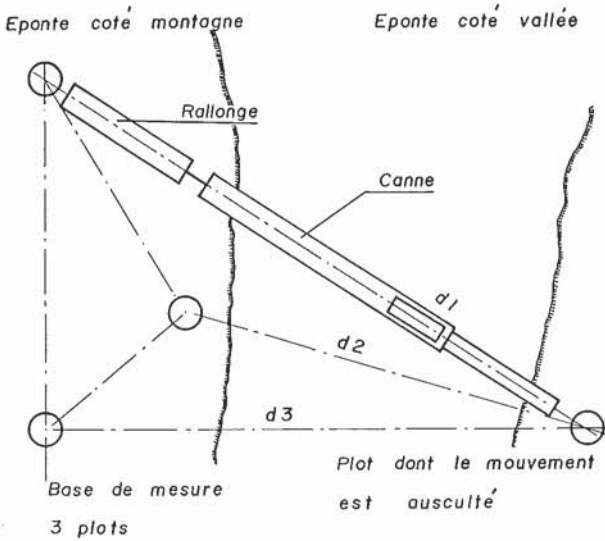


Fig. 6 — Schéma de principe

— Une application de ces dispositifs (fig. 8).

La reprise périodique des mesures Δd_1 , Δd_2 et Δd_3 définit un vecteur appelé norme vecteur de déplacement (NVD), lequel est représenté graphiquement (fig. 7).

L'emploi de télécapteurs de déplacement s'est avéré efficace à l'occasion de l'auscultation d'une zone instable, très fracturée, surplombant une carrière d'enrochements en cours d'exploitation. Pour assurer la sécurité des personnes et le cas échéant décider l'évacuation du chantier, il importait de suivre l'évolution du phénomène en permanence, à distance, et avec un maximum de finesse afin d'en déceler une éventuelle accélération. Un

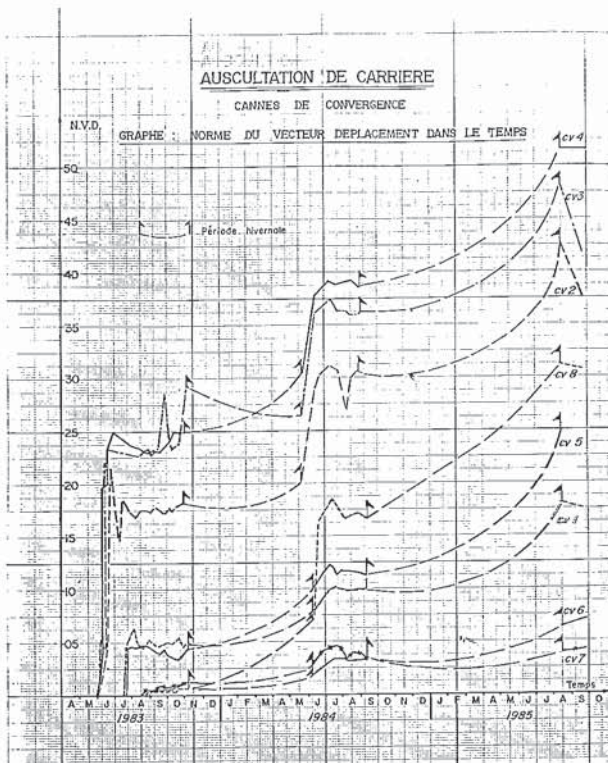


Fig. 7 — Photo carrière d'enrochement de Grand Maison

dispositif d'auscultation géodésique vient compléter ces mesures donnant ainsi l'indication des déplacements absolus du massif. A posteriori, on peut remarquer (fig. 4b) que le versant est le siège de crises annuelles localisées (début juin) dont l'importance est fonction des conditions de la fonte des neiges qui fait brutalement remonter la piézométrie dans le versant. A cette époque de l'année, la couverture neigeuse interdit toutes mesures géodésiques lesquelles seules n'auraient donc pas permis d'isoler le phénomène dans le temps.

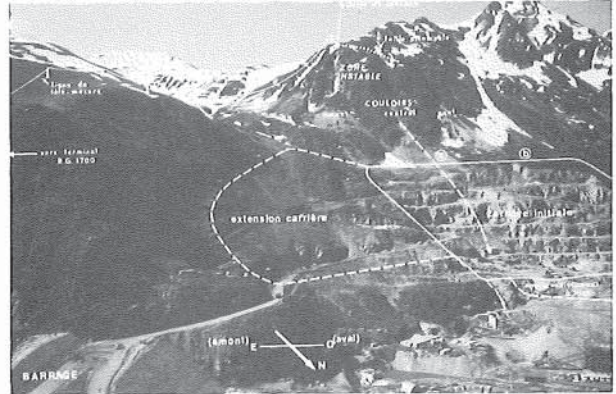


Fig. 8

III.7 Les mesures au fil invar

Le fil invar reste l'un des instruments de mesures de distances les plus précis et, à ce titre, est très souvent employé à EDF pour l'auscultation des ouvrages de génie-civil sous deux formes :

- Associé à un appareil de mise en tension et de lecture automatique. Sa facilité d'utilisation rend la mesure possible par des personnes non qualifiées sous réserve toutefois d'une manipulation soignée des fils invar.

Précision :

distances < 20 m : $\pm 0,02$ mm
 distances > 20 m : $\pm 1.10^{-6} \times D$

Il est utilisé en particulier pour :

- le suivi des déformations d'une section de tunnel, de galerie, d'ovoïde... (fig. 9).

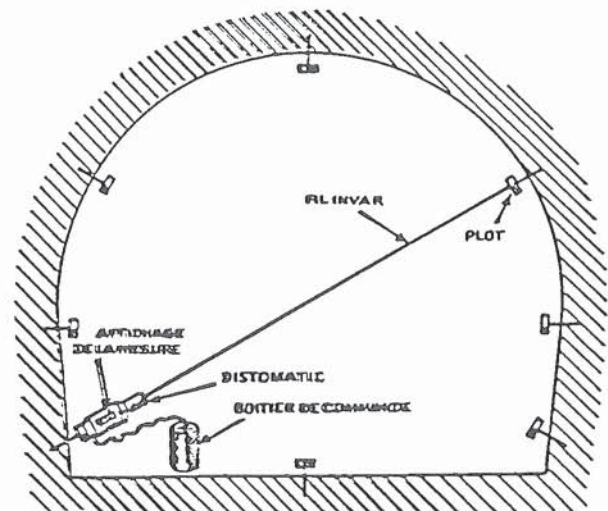


Fig. 9

- le suivi de la convergence des parois d'une usine souterraine après creusement (effet de décompression du rocher). Placé au niveau du pont roulant, ce dispositif permet de corriger le parallélisme des rails.

UN SURDOUJÉ INFORMATIQUE EST ARRIVÉ

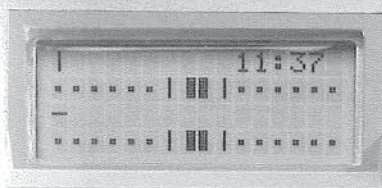
Quelques exemples éloquentes de ce qu'il peut afficher sur son écran au moyen d'une manipulation simple.

Bien que le GEODIMETER SYSTEM 400 soit un appareil sophistiqué son utilisation s'avère particulièrement simple, notamment grâce au système de "menus".

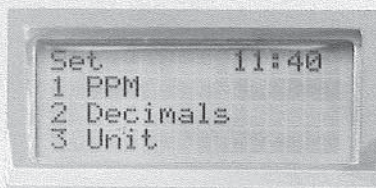
Un clavier intégré étanche comportant 16 + 4 touches donne à l'opérateur accès aux divers menus. Ce même clavier permet également la sélection du mode de mesure, le choix des fonctions (0 à 99), la sélection des fonctions d'affichage et de validation, la mise en service du tracklight ou de l'unicom, l'enregistrement des angles et distances mesurés et le déclenchement des mesures.

L'affichage est du type LCD à cristaux liquides. Il est composé de 4 lignes de 16 caractères qui s'éclairent automatiquement lorsque la lumière ambiante n'est plus suffisante. Lorsque la température descend au-dessous de 0° un thermostat intégré en déclenche automatiquement le chauffage.

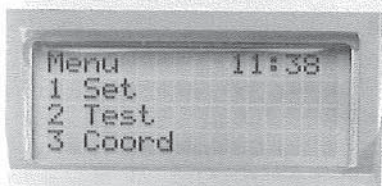
Voici quelques exemples de ce qu'un opérateur peut obtenir aisément à l'affichage :



Tout d'abord une nivelle électronique permet de niveler l'instrument dans une seule position et sans avoir à tourner l'alidade. L'heure s'affiche en permanence en haut et à droite de l'écran grâce à une horloge interne.

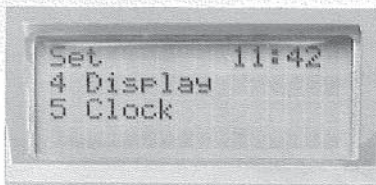


Si l'opérateur décide d'appeler la rubrique SET, il lui suffira d'appuyer sur la touche 1 du clavier et un nouveau choix se présentera devant lui grâce auquel il pourra vérifier ou modifier les données de fonctionnement de l'appareil.



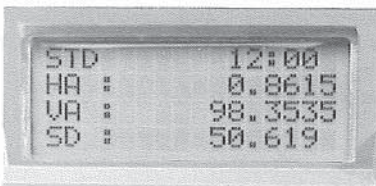
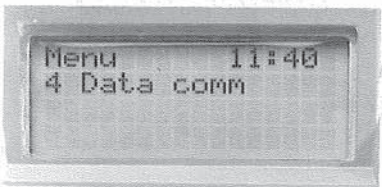
L'opérateur ayant choisi d'appeler le menu principal les options suivantes s'offrent à lui :

- 1 - SET : mise au point initiale
- 2 - TEST : contrôle de l'instrument
- 3 - COORD : introduction des coordonnées station
- 4 - DATA COMM : introduction des données pour la sortie RS 232 et Géodat.



Après ces éventuels contrôles préliminaires l'opérateur effectuera ses mesures qui pourront apparaître selon la forme figurant sur notre exemple.

HA : Angle Horizontal
VA : Angle Vertical
SD : Distance inclinée
mais deux autres présentations sont possibles :
- Angle horizontal, distance horizontale, dénivelée,
- Coordonnées X Y Z



L'universalité du **Geodimeter System 400** est indiscutable :

Haute précision, mesure rapide et continue, grande portée, faisceau visible, nivelle électronique, liaison phonique, dénivelé en continu, calcul XYZ, sortie directe RS 232...

Toutes les applications lui sont alors permises :
canevas, tachéométrie, implantation, bathymétrie, auscultation, polygonation, industrie...



Parc d'Activités
Les portes de la Forêt
Allée du Clos des Charmes
77400 COLLEGIEN
Tél : (1) 60 05 13 14
Télex : 693 099

M. : _____
Cabinet ou Sté : _____
Adresse : _____
désire des renseignements
complémentaires sur le
GEODIMETER
SYSTEM 400

GEO.9.86



Geodimeter System 400

nouveau



**UN
SURDOUÉ
SUR LE TERRAIN**

*Intelligent, évolutif, simple,
il sait aussi dialoguer avec son utilisateur*

- En traditionnel (poulies - poids - tenseurs - lecture sur réglette).

Il se trouve encore quelques applications lorsque l'appareil de mise en tension automatique n'est pas utilisable.

- en mode suspendu, soit pour transmettre un nivellement, le fil est alors étalonné, soit en mesure différentielle, auquel cas, il est comparé régulièrement à une base fixe ou à un autre fil ;

- pour le contrôle planimétrique des tables de groupes turbo-alternateur des centrales nucléaires dont le désalignement des axes pourrait avoir des conséquences mécaniques et financières très importantes : la méthode consiste à définir un alignement de référence à l'aide d'un théodolite bloqué en azimut et à effectuer des mesures sur la réglette d'un fil invar, solidaire de la table de groupe et tendu perpendiculairement à la visée de référence. A cet effet, le théodolite est équipé d'un micromètre à lame plan-parallèle (fig. 10) ;

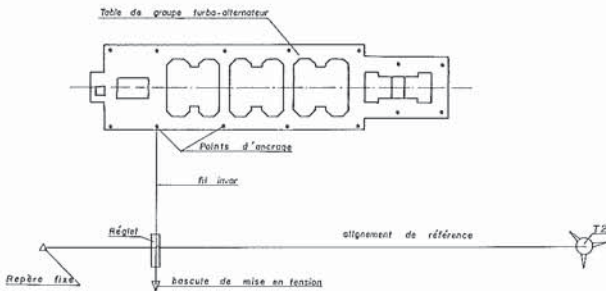


Fig. 10

- pour le suivi de l'écartement aux tympans de ponts routiers à l'occasion du passage de convois lourds. A noter l'utilisation simultanée du fil invar et de deux lunettes nadirales car les déformations au niveau des tympans d'ouvrages anciens en maçonnerie, ne sont pas forcément transmises au tablier souvent plus récent et de structures différentes (fig. 11).

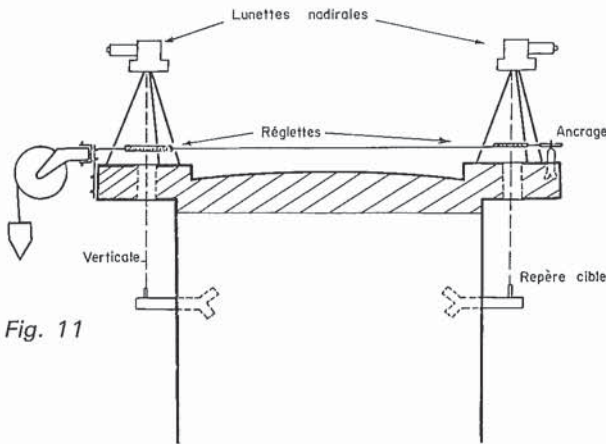


Fig. 11

III.8 Les pendules directs ou inversés

Les pendules directs ou inversés matérialisant une verticale servant de référence à la mesure de déplacement relatif de deux ou plusieurs points éloignés, situés sur cette verticale.

- le pendule direct est un fil à plomb dont le poids est stabilisé dans un bac contenant de l'eau et de l'antigel ;

- le pendule inversé se caractérise par la position de son ancrage (point bas), le fil étant tendu verticalement à l'aide d'un flotteur (fig. 12).

La mesure des déplacements se fait avec une table de lecture placée à différents niveaux et qui donne, à l'aide

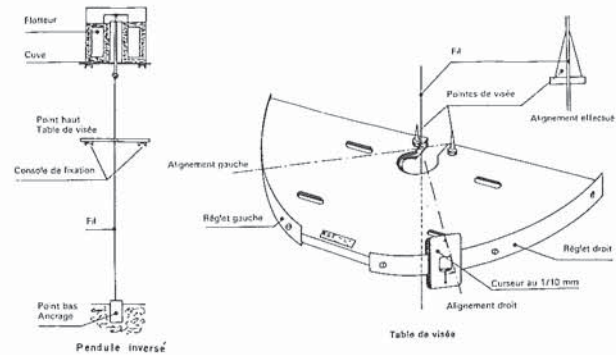


Fig. 12

d'abaques, le déplacement de la table par rapport au fil dans deux directions orthogonales.

Une combinaison de pendules inversés ancrés dans la fondation (forage) avec des séries de pendules directs indique les déplacements absolus de l'ouvrage.

Sensibles et efficaces, l'exploitation des pendules est simple. Il est possible en outre d'y adjoindre un dispositif de télémessure.

Principaux inconvénients :

- sensibilité aux courants d'air ;
- difficulté du contrôle du domaine libre du pendule ;
- ne s'applique qu'aux barrages poids en béton ;
- l'équipement a posteriori d'un ouvrage n'est pas envisageable ;

IV. Mesures de déformations par la topographie

La mesure est un acte, en connaître la précision est sa crédibilité.

On serait tenté, connaissant la précision des mesures de n'indiquer au concepteur de l'ouvrage que les déplacements significatifs au regard de l'ellipse ou ellipsoïde de tolérance entourant les points à ausculter. Toutefois, si l'on agit ainsi, on risque dans certains cas, par notre interprétation, de fausser les déplacements relatifs de points voisins sur l'ouvrage.

Soit 2 points voisins 1 et 2 sur un ouvrage à ausculter (fig. 13) : comparés à leur ellipse de tolérance respective, on conclut que le point 1 n'a pas bougé mais que le déplacement du repère 2 est significatif. D'où un Δ apparent accru par rapport au Δ mesuré. Cet exemple montre que l'analyse topographique bien que rassurante peut conduire à des résultats erronés.

Il n'y a pas de doctrine figée en la matière. Seul le concepteur de l'ouvrage est en droit de trancher sur ce qu'il attend des mesures topographiques et il importe d'avoir son avis. Néanmoins, il semble se dégager les idées suivantes :

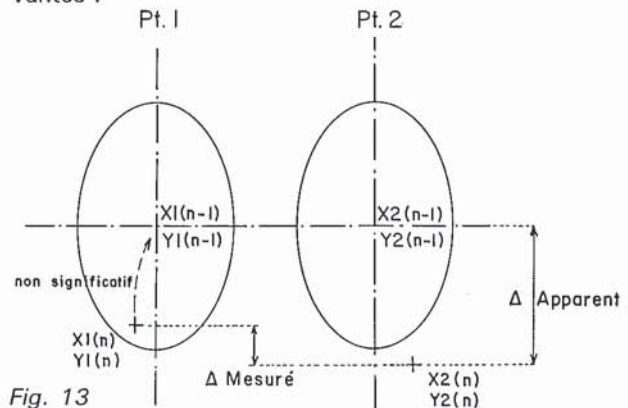


Fig. 13

— si on recherche une déformation de l'ouvrage, le résultat brut est donné ainsi que l'enveloppe d'incertitude ;

— si on recherche un déplacement absolu, sachant que les mouvements relatifs sont aussi analysés, il se dégage deux idées :

1. Pour une structure liée tels que réfrigérant, barrage en béton, les valeurs brutes sont indiquées au concepteur de l'ouvrage ;

2. Pour une structure naturelle (versant instable) ou une digue en terre, seuls les déplacements significatifs sont retenus.

On considère qu'un déplacement est significatif s'il est supérieur à l'enveloppe d'incertitude calculée sur la base de 2 fois l'écart type théorique.

Probabilité 95,4 % pour une mesure unidimensionnelle.
Probabilité 86 % pour la planimétrie (ellipse).

Au sujet de la fréquence des mesures d'auscultation : en phase essai de l'ouvrage, la fréquence est le plus souvent liée à des niveaux de contraintes pré-définis (charge sur un radier, hauteur d'eau dans une retenue). En exploitation, les mesures sont faites avec un Δt constant.

L'amplitude d'un phénomène doit déterminer, en règle générale, la fréquence des mesures. La bonne fréquence est celle qui définit un vecteur de déplacement légèrement supérieur à la valeur test du mouvement. Elle doit donc être évolutive selon que le mouvement se ralentit ou s'accélère.

IV.1 Le nivellement

Pratiquement tous les ouvrages que nous surveillons comportent un dispositif d'auscultation altimétrique, soit unique, soit en complément d'un dispositif géodésique, en raison de la finesse des mesures que procure la méthode. Les observations sont faites :

- soit au N3 — mire avec ruban invar - parasol écart-type : $\pm 0,6$ mm au kilomètre
- soit au NA2 et lames à faces parallèles - mire invar écart-type : ± 1 mm au kilomètre

Les dispositifs ne sont pas tous conçus sur le même schéma. En voici quelques exemples.

IV.1.1 Radier des bâtiments des centrales nucléaires

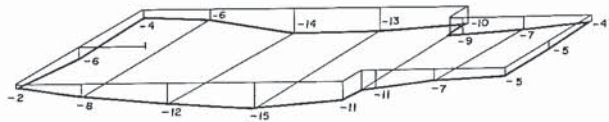
Le but recherché est d'évaluer voire d'anticiper les tassements et basculement différentiels entre les radiers de plusieurs bâtiments voisins.

Le dispositif comporte le rattachement à la référence altimétrique du site dont la stabilité est par ailleurs contrôlée, ainsi que le nivellement de repères distribués sur les radiers. A chaque opération on calcule :

- le plan moyen représentatif de l'état du radier par la méthode des moindres carrés ;
- l'écart de chaque point au plan moyen pour connaître la déformation du radier ;
- le tassement en son centre s'il n'a pu être mesuré directement ;
- le basculement du bâtiment.

Une critique systématique du modèle mathématique est faite par l'examen des résidus.

Cas d'un radier alvéolaire fortement chargé en son centre pour lequel le modèle "plan" serait une faute (effet de bol) (fig. 14).



DEFORMATION TABLE DE GROUPE

Fig. 15

IV.1.2 Table de groupe turbo-alternateur (fig. 15)

Le but est de contrôler la déformation de la table pouvant entraîner un désalignement des différents axes du groupe. Il s'agit donc de mesures relatives exprimées par rapport à un repère de la table lui-même rattaché à la référence altimétrique du site pour la connaissance du tassement global de la table.

IV.1.3 Glissement de terrain

La zone instable est traversée par des rangées de sentiers de nivellements rattachés :

- en aller-retour sur des repères extérieurs dont la stabilité est contrôlée ;

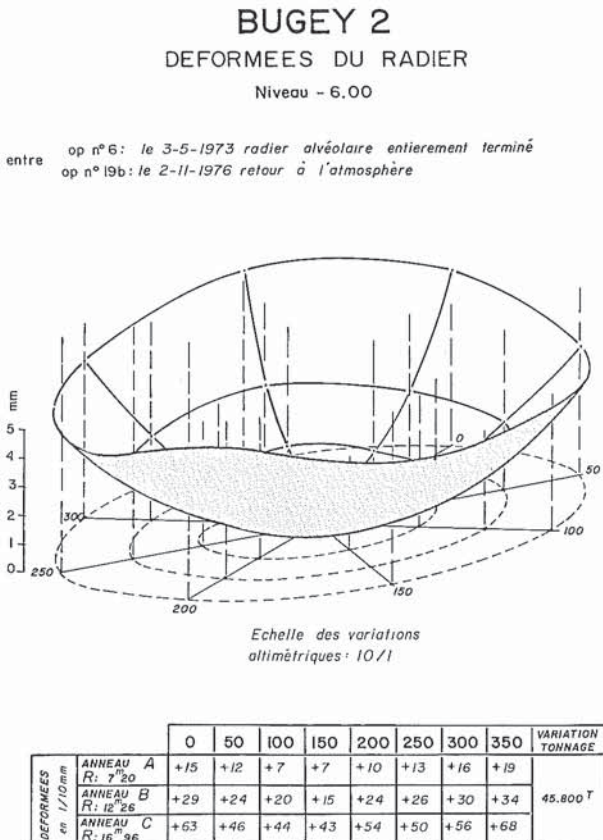


Fig. 14

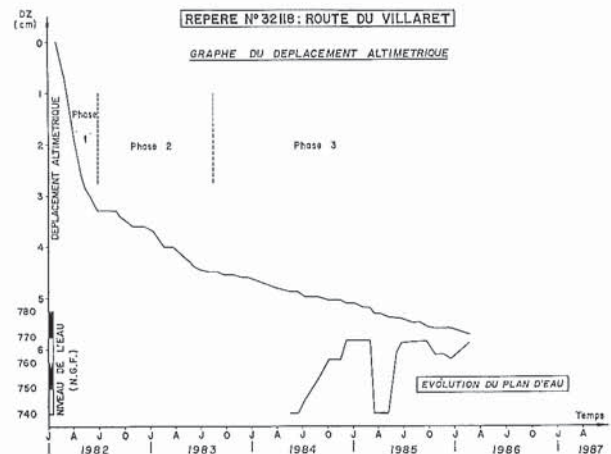


Fig. 16

— en cheminement simple si la zone instable se situe entre des groupes de repères fixes.

Restitution graphique (fig. 16).

Cet exemple illustre la corrélation entre le phénomène et les facteurs influents.

Phase 1. Déstabilisation du massif à la suite d'un arrachement important provoqué par une crue ;

Phase 2. Travaux de blocage du pied de talus par des enrochements (la vitesse du phénomène diminue) ;

Phase 3. Travaux de blocage terminés. Vitesse plus faible mais constante. Le phénomène semble irréversible.

En terrain naturel, les repères sont constitués de barres enfoncées à refus, recoupées sur place et protégées par un massif béton non solidaire du repère.

VI.1.4 L'alignement (fig. 17)

La méthode ne s'applique qu'à la mesure d'un mouvement unidirectionnel dont la direction privilégiée est connue. Elle consiste à déterminer le déplacement de repères alignés par la variation angulaire mesurée à partir d'une station placée sur un axe perpendiculaire au déplacement. On suppose une stabilité parfaite de la station ainsi que de la référence laquelle est généralement matérialisée par une autre station permettant une double détermination des repères.

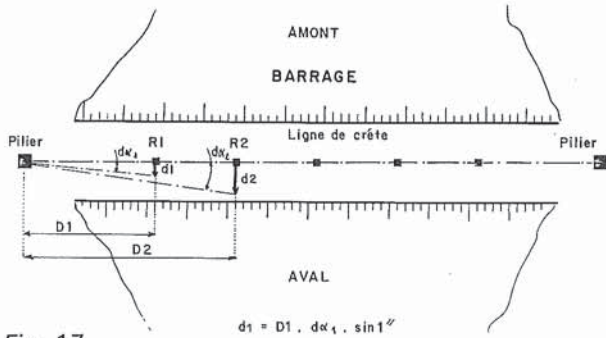


Fig. 17

Précision de la mesure : ± 1 mm de 0 à 200 mètres.

Cas d'utilisation de la méthode :

- déformation d'un mur sous une contrainte ;
- flambage d'un support ;
- décompression du rocher dans une usine souterraine ;
- déformée de la ligne de crête d'un barrage sous la poussée de l'eau (fig. 18).

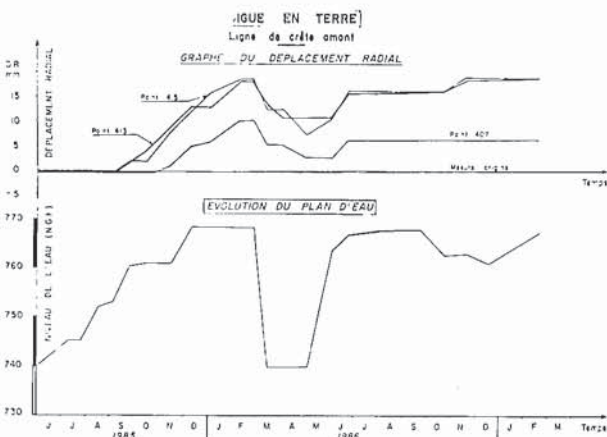


Fig. 18 — Evolution du déplacement radial par la méthode des alignements

Les mesures peuvent être exploitées de deux manières selon qu'on recherche :

— une déformation ; auquel cas les déplacements sont exprimés par rapport à la droite définie par les deux repères d'auscultation extrêmes de l'ouvrage ;

— un déplacement absolu ; ceci supposant une bonne stabilité de la station ainsi que des références multiples.

IV.2 L'auscultation par méthode géodésique

La méthode consiste à déterminer, à partir d'un canevas de référence, la position spatiale des repères par polygonation, triangulation, multilatération ou triangulation.

IV.2.1 Conception du canevas de référence

C'est une phase délicate de l'auscultation qu'il convient de ne pas négliger au risque de passer à côté du résultat escompté. La difficulté majeure est d'allier les critères techniques de configuration et de pérennité aux possibilités d'emplacements laissées libres sur un chantier en activité. Encore faut-il bien sûr qu'il y en ait ou que l'on puisse les imposer !!

CANEVAS D'AUSCULTATION D'UN REFRIGERANT

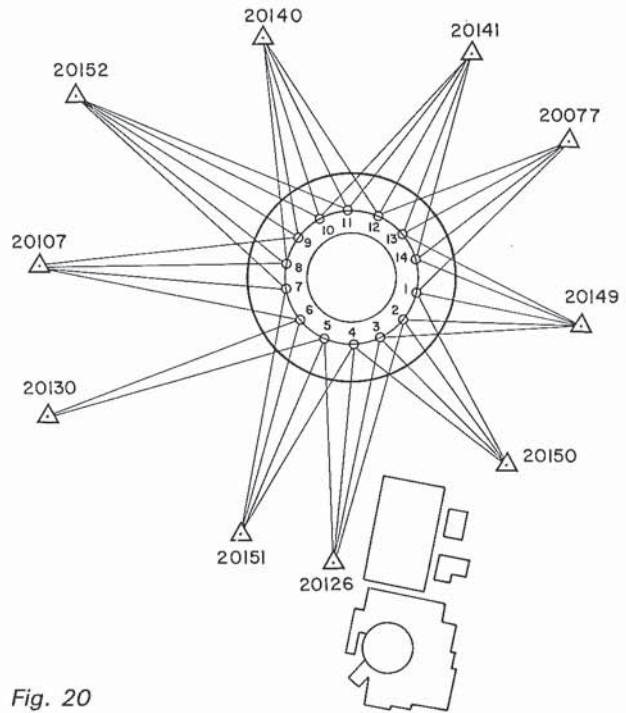


Fig. 20

Aux critères de pérennité du canevas s'ajoutent :

- sa forme : une bonne configuration est requise :
- pour sa propre détermination
- pour la détermination des repères à ausculter

Considérant que chaque repère d'auscultation doit en général être déterminé par 4 lieux géométriques bien conformes (3 a minima), que les visées trop inclinées doivent être évitées, et compte tenu de la forme même de l'ouvrage à ausculter, et des moyens d'observations retenus, on peut imaginer que l'architecture du canevas "s'intégrant naturellement au site" comme la solution la mieux adaptée au problème (fig. 20 et 21).

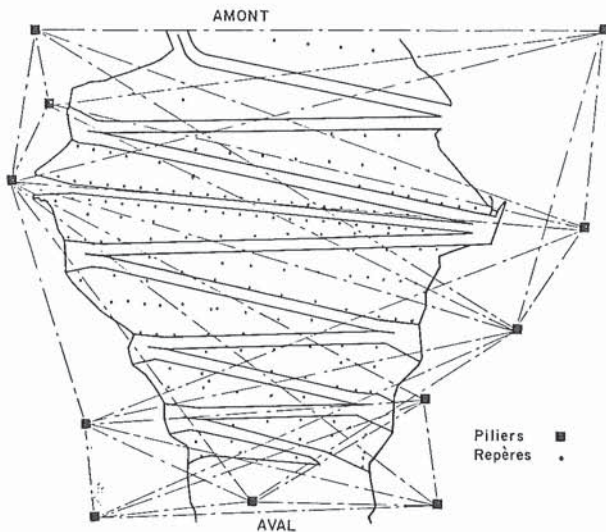


Fig. 21 — Canevas d'auscultation d'un barrage en enrochements.

— sa précision :

A EDF, on s'impose pour le canevas :

écart-type planimétrique relatif entre 2 repères consécutifs :

$$\sigma x = \sigma y = \pm 2 \text{ mm}$$

écart-type sur chacun des repères par rapport à la référence altimétrique du site :

$$\sigma z = \pm 1 \text{ mm}$$

En outre, sur les repères à ausculter, on retient les précisions suivantes par rapport au canevas de référence.

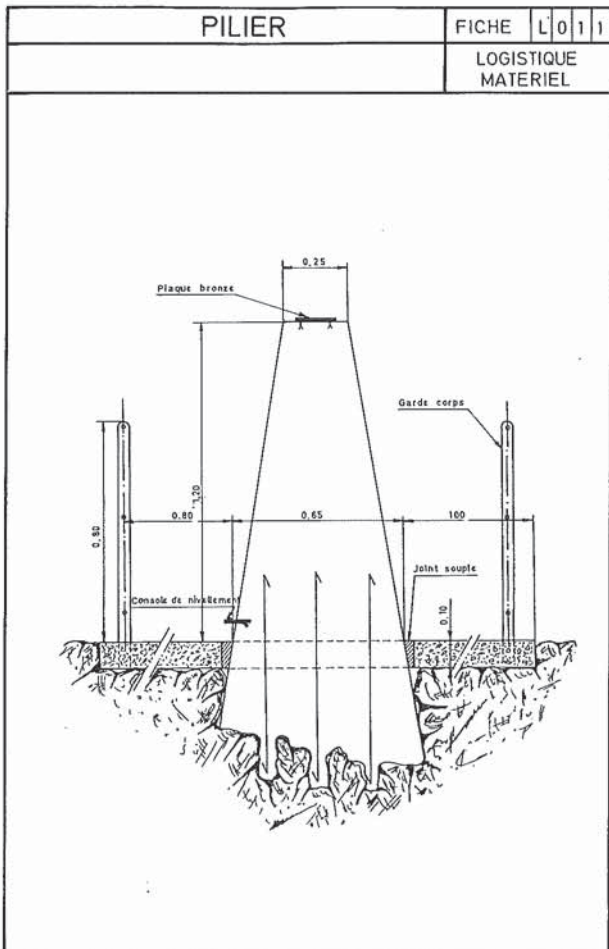


Fig. 22

- Coque d'un réfrigérant : $\sigma x = \sigma y = \sigma z = \pm 2 \text{ cm}$
- Barrage béton : $\sigma x = \sigma y = \sigma z = \pm 1 \text{ mm}$
- Barrage terre ou enrochement : $\sigma x = \sigma y = \sigma z = \pm 5 \text{ mm}$

Quel que soit le cas de figure retenu, une optimisation de la configuration géométrique du canevas est étudiée en faisant varier les paramètres de précision des mesures angulaires et/ou des distances liées à la méthode retenue. Des simulations de calculs sur micro-ordinateur définissent ainsi, à partir du canevas projeté les ellipses (ou ellipsoïdes) d'incertitude autour des repères d'auscultation. Si l'on recherche une précision homogène dans toutes les directions, la zone d'incertitude doit se rapprocher du cercle. Au contraire, si l'on désire mesurer un mouvement particulier dans une direction privilégiée, le choix des emplacements des stations peut conduire à définir des ellipses d'incertitude dont le rapport Grand axe/Petit axe peut être important.

— sa matérialisation :

Les canevas sont constitués en règle générale de piliers équipés de plaque de centrage permettant la mise en station directe des appareils de mesure d'angle et de distance. 2 types de piliers sont utilisés :

- forme pyramidale (fig. 22)

D'un prix relativement élevé, il est tout de même fortement recommandé en raison de sa robustesse et de sa bonne assise. On apprécie en particulier les conditions d'observation et la mise en œuvre aisée du théodolite.

- forme cylindrique (pilier buse)

Bien que le remplacement du coffrage par une buse diminue le coût de fabrication, son emploi tend à disparaître. Le retrait du béton favorise les infiltrations d'eau entre la buse et le pilier, puis l'attaque par le gel.

— sa stabilité :

Le souci de diminuer les distances pour réduire les sensibilités des visées, combiné avec la nécessité de bonnes intersections impose des stations peu éloignées de l'ouvrage. De ce fait, certaines stations risquent de subir des déplacements liés à ceux de l'ouvrage. Afin d'y remédier, une base constituée au minimum de 3 piliers formant au mieux un triangle rectangle isocèle ou un alignement, est implantée en dehors de la zone d'influence de l'ouvrage de façon à pouvoir la contrôler en permanence.

La fondation du pilier fait l'objet d'une attention particulière, qu'il soit construit sur du rocher ou sur du terrain meuble. Sur les sites nucléaires implantés dans des plaines alluvionnaires, les piliers de la base sont ancrés dans les sous-couches dures par l'intermédiaire de pieux forés et bétonnés. Le pilier peut être équipé d'un dispositif propre, complémentaire, permettant, le cas échéant, de mesurer le déplacement planimétrique de sa tête :

- mise en place d'un pendule inversé dans le pieux bétonné, et ancré dans la couche stable du sous-sol ;
- relèvement sur des points proches considérés stables ;
- nivellement relatif de précision de 4 points opposés 2 à 2, scellés à la base du pilier. Ceci permettant d'en mesurer son basculement.

IV.2.2 Equipements des piliers

— plaques de centrage (fig. 23)

Le centrage du théodolite se fait par l'intermédiaire des pointes des vis calantes qui viennent se positionner :

- soit dans les 3 rainures radiales à 120°
- soit dans 3 traces usinées dans la masse "trait-point-plan" formant un triangle équilatéral à l'écartement du théodolite.

Ce type de centrage, rapide et simple est imparfait car,

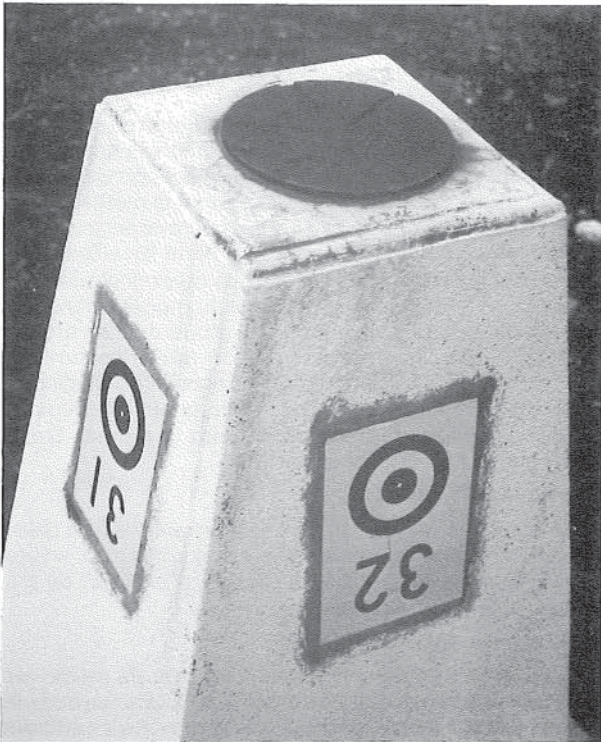


Fig. 23

par construction la géométrie des 3 vis calantes n'est pas garantie, ou bien modifiée en cas de choc.

La précision du centrage est de 0,1 à 0,5 mm.

— voyants cibles excentrées :

Des cocardes en lave sont scellées sur les faces des piliers dans le but de matérialiser de façon permanente l'axe de centrage du théodolite. Ce système s'avère particulièrement intéressant sur des sites montagneux (auscultation de barrages) où les piliers sont d'accès difficile. Un ciblage de l'axe de centrage observable de toutes les directions nécessiterait un voyant tige dont l'emploi est déconseillé en raison des erreurs de pointés dues à l'éclairage (erreur de phase).

A noter aussi que les cocardes excentrées augmentent la disponibilité d'un dispositif en permettant le travail simultané et sans gêne de plusieurs équipes d'observation.

Chaque visée entre pilier est affectée d'un décentrement propre qui est considéré comme une constante angulaire. Les éventuelles variations dues aux mouvements relatifs des stations sont généralement d'un ordre inférieur à l'erreur moyenne de mesure angulaire (fig. 24).

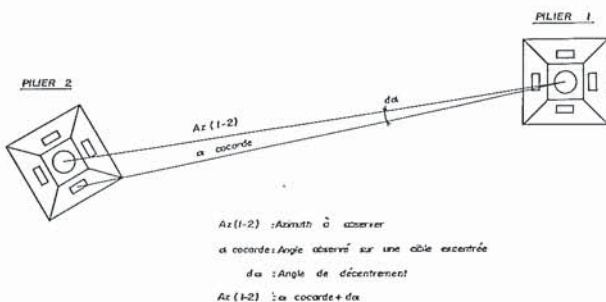


Fig. 24

Pour minimiser l'incidence d'un basculement du pilier, la cocarde excentrée est scellée au plus près de la plaque de centrage.

Détermination du décentrement

1. Par la mesure angulaire directe :

L'axe de centrage étant matérialisé par un voyant type Wild ou modèle EDF, les décentremments étaient jusqu'alors déterminés par mesure directe en 2 fois 2 paires de séquences au T3 ou au T2000. La méthode n'était toutefois pas satisfaisante.

- observations angulaires fastidieuses ;
- beaucoup de déplacements et de temps morts : pour chaque station il faut réorienter les voyants de toutes les autres stations ;
- perte de précision sur l'azimut ainsi observé (dans le rapport $\sqrt{2}$)

2. Par l'intermédiaire d'un tachéomètre courte distance (fig. 25a - 25b)

Il s'agit* d'un appareil prototype conçu par un élève de l'Institut de Topométrie à l'occasion du stage effectué dans nos services. En stationnant le pilier, on mesure directement les coordonnées polaires de ses cocardes. Il permet ainsi :

- soit d'utiliser directement les coordonnées X, Y des cocardes (détermination d'un Vo) ;

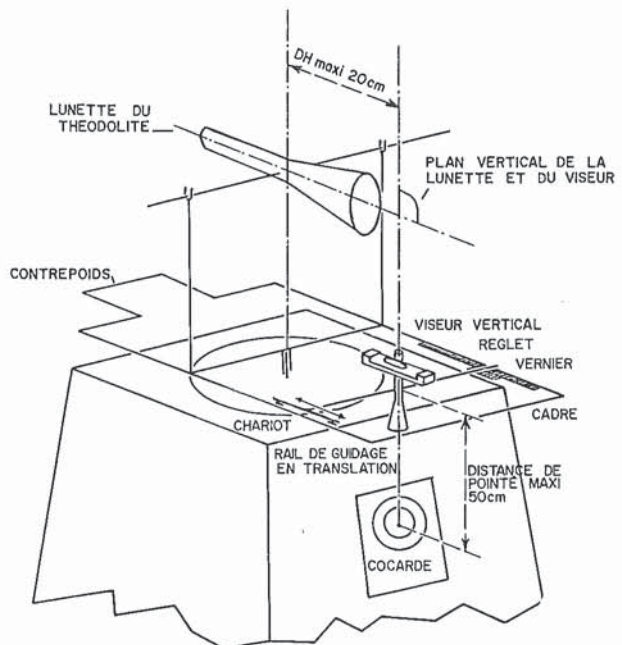


Fig. 25a

— soit de calculer les décentremments des piliers voisins. Afin de réobserver un canevas en utilisant les décentremments sans perte de précision, on s'est fixé des contraintes mécaniques et de réglage telles que la tolérance sur le $d\alpha$ d'un pilier distant de 100 mètres soit de 1 dmgr. L'écart maximum de pointé sur la cible avec le viseur du tachéomètre courte-distance doit être inférieur à 0,15 mm.

L'élément de base est un théodolite type T2. Un viseur vertical guidé en translation par un cadre fixé au théodolite permet de pointer la cible excentrée (fig. 25).

Son axe optique reste dans le plan vertical contenant l'axe optique du T2. Ainsi l'azimut de la cocarde est lu sur le limbe du théodolite.

Le support du viseur vertical porte un vernier afin de lire à 0,1 mm, sur un réglet solidaire du cadre, la distance horizontale entre la cible et l'axe principal du T2.

* M. Gérard SINDT : Institut de Topométrie.

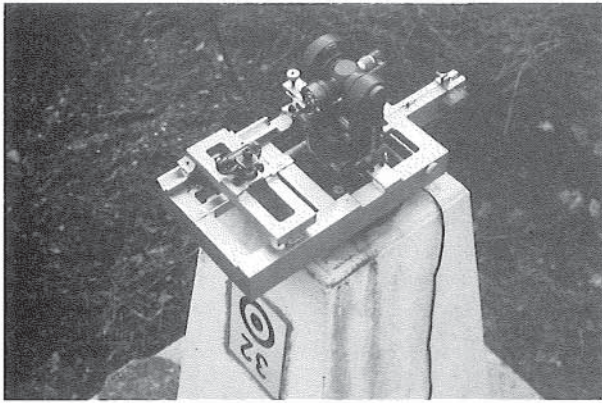


Fig. 25b

Compte tenu de la longueur du rayonnement (20 à 30 cm) une lecture au centigrade est suffisante.

Réglages périodiques de l'appareil (fig. 26-1 et 26-2).

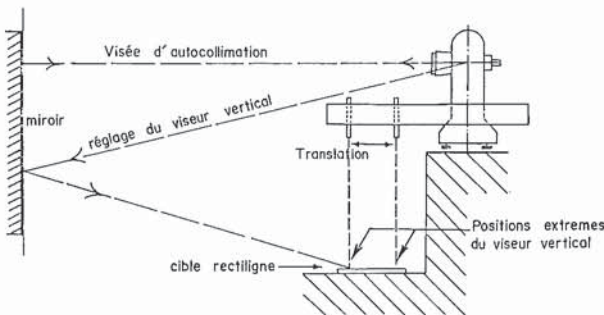


Fig. 26-1 — Opération de réglage destinée à rendre coaxial le viseur vertical et l'axe optique du théodolite.

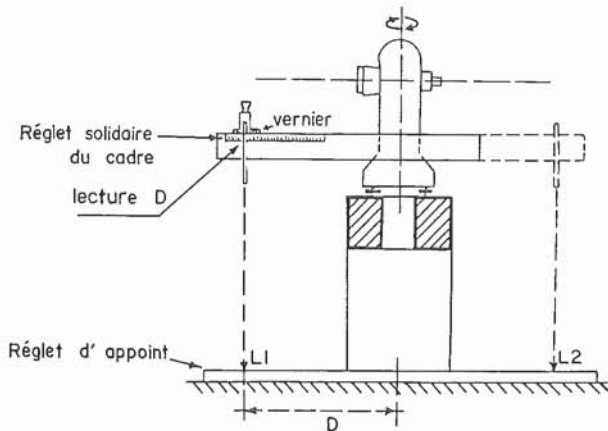


Fig. 26-2 — L1 : lecture faite sur un réglet d'appoint
L2 : lecture symétrique après rotation de 200 gr du T2

La lecture D donnée par le tachéomètre doit être égale à $(L1 + L2)/2$.

Le viseur vertical est monté sur un roulement à bille. Après rotation de 200 degrés, on élimine ainsi un éventuel défaut de verticalité de l'axe optique.

IV.2.3 Matérialisation des repères d'auscultation

La plupart des dispositifs d'auscultation à EDF utilisent des cocardes en lave émaillée :

- ciblage permanent évitant tout risque de non répétitivité lié à l'emploi d'un système amovible ;
- inaltérable dans le temps ;
- excellente qualité du pointé ;

— symétrie de l'image quel que soit l'angle d'incidence de la visée.

Elles sont scellées soit directement sur l'ouvrage (barrage béton, coque de réfrigérant), soit sur des supports intermédiaires (fig. 27).

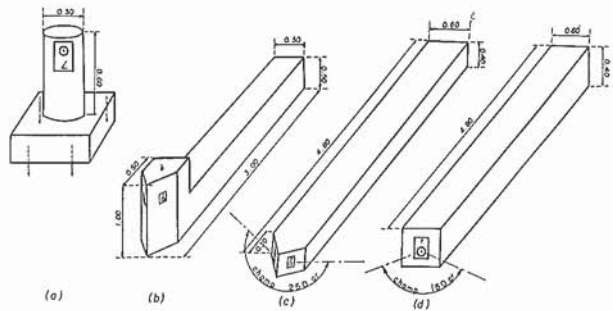


Fig. 27

- a) socle buse pour versants instables
- b) longrine double cible pour barrage en terre (réhaussée pour éviter la gêne due à l'herbe)
- c) longrine double cible pour barrage en enrochements
- d) longrine à une cible

Les longrines double cible, par l'augmentation du champ de visée, rendent optimum le canevas de référence en diminuant sensiblement le nombre de stations nécessaires.

A l'occasion de la mesure origine, toutes les visées possibles doivent être observées afin de calculer les constantes angulaires permettant de se ramener à un repère unique (fig. 28).

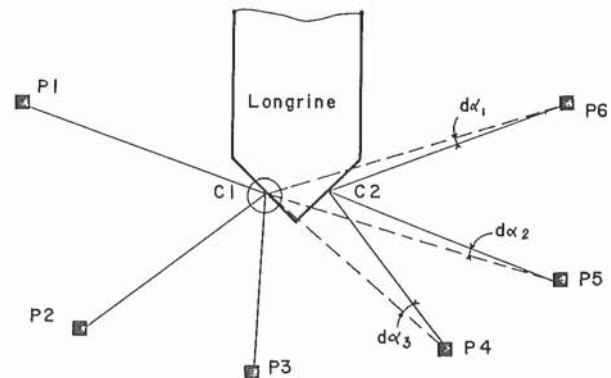


Fig. 28

Les visées P6-C2, P5-C2, P4-C2 seront corrigées des angles $d\alpha_1$, $d\alpha_2$, $d\alpha_3$, lesquels sont des constantes.

Autres types de repères :

- a) tige inox de diamètres 12 millimètres recevant un prisme ou un voyant Wild
- b) cible aluminium fabriquée en sérigraphie pour de petits dispositifs d'auscultation

IV.2.4 Les observations angulaires

En règle générale, elles sont faites au T2000 ou au T3, ou les deux associés (précisions identiques). Une simulation de calcul guide le choix du concepteur du dispositif d'auscultation sur le nombre de séquences à retenir (1 ou 2 paires aux pointés multiples).

Les opérations courantes du secrétaire de terrain sont prises en compte par le GRE 3 pour le T2000, ou un Epson HX 20 pour le T3 sous contrôle d'un logiciel qui assure les fonctions suivantes :

- assistance de l'opérateur
- décompte des pointés et rejets des hors tolérances
- calcul des moyennes
- calcul de la fermeture de séquence, rejet éventuel
- stockage des observations ramenées à zéro
- transfert du fichier observations sur le terminal de bureau par l'intermédiaire d'une interface standard (RS 232).

IV.2.5 Les observations de distances

Appareils utilisés à EDF pour la mise à l'échelle d'un canevas géodésique ou la détermination des repères d'auscultation :

- mécomètre ME 3000 KERN (écart-type $(0,2 + L(\text{km}))\text{mm}$)
- telluromètre MA 100 (écart-type $(1 + L(\text{km}))\text{mm}$).

IV.2.6 Calculs

Le traitement informatique des données s'effectue en trois étapes :

1. Calcul du canevas de référence :

Le canevas est redéfini à chaque opération afin de contrôler la stabilité des points qui le composent. Le logiciel de calcul utilise la méthode des variations de coordonnées laquelle s'applique indifféremment aux observations angulaires et aux observations linéaires. La résolution du système des équations linéarisées résulte de l'application du principe des moindres carrés. Notre système informatique étant pourvu de fonctions matricielles, il est intéressant d'utiliser la méthode de la matrice inverse. Le canevas est appuyé sur les points fixes du site (piliers fondés sur pieux) ou bien, à défaut de fondation spéciale, des essais successifs sont développés sur des hypothèses différentes. L'examen des mouvements apparents des piliers, au regard des ellipses de tolérance, permet de proche en proche d'isoler les points stables du canevas.

2. Les repères d'auscultation :

Schéma général du traitement des observations (fig. 29)

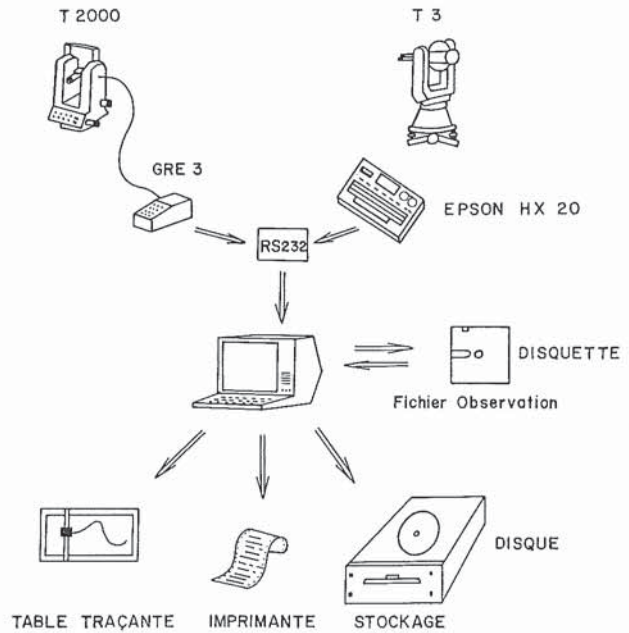


Fig. 29

- création d'un fichier d'observations par transfert direct à partir des GRE3 ou des EPSON HX 20 ;
- déclaration des points à calculer (entrée point par point ou entrée séquentielle), et de l'écart-type des instruments utilisés.

PROFIL EN TRAVERS

GRAPHE DES DEPLACEMENTS DR DZ

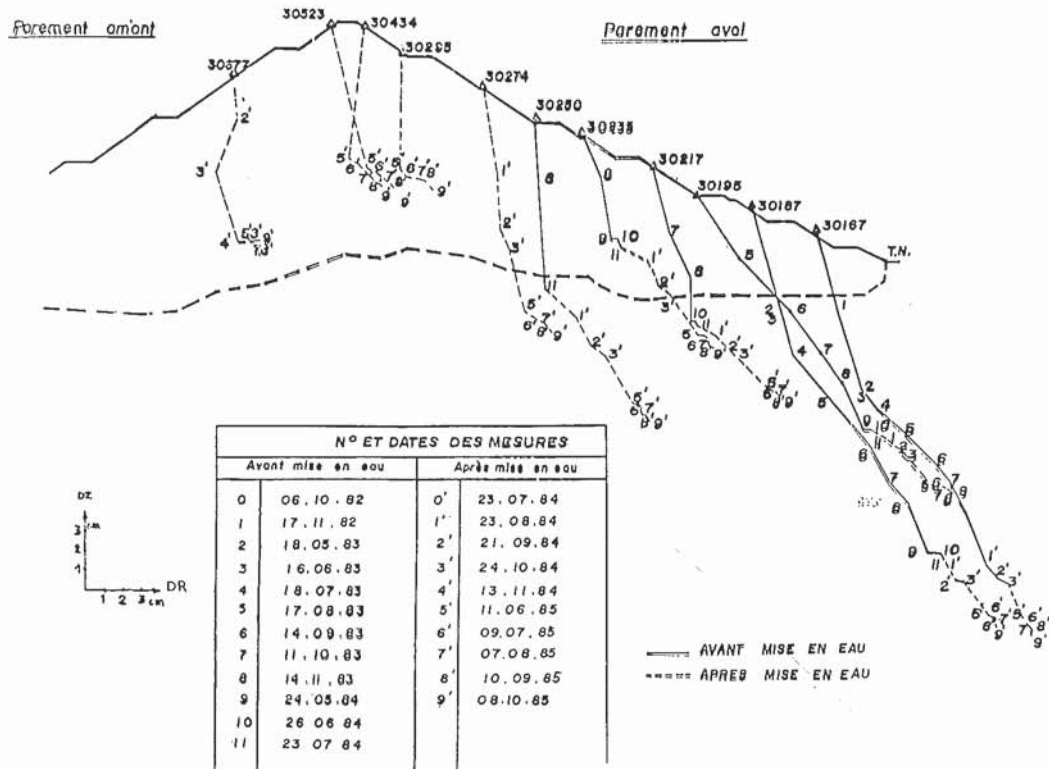


Fig. 30

Le calcul est alors rendu automatique par l'intermédiaire d'un programme pilote. Pour chaque point :

- recherche des observations dans le fichier
- calcul du repère (moindres carrés)

Lorsque tous les points sont calculés, le fichier des coordonnées de l'opération est stocké sur disque.

3. Analyse topographique :

Elle consiste à comparer le déplacement d'un repère à son ellipse de tolérance. Pour tout repère dont le déplacement est jugé non significatif, les coordonnées de l'opération (n-1) seront maintenues.

Un dispositif d'auscultation doit être parfaitement répétitif dans le temps. L'ellipse de tolérance étant dimensionnée à 2 écarts-types de l'instrument, elle est donc une constante du point.

IV.2.7 Edition des résultats

Les dx, dy sont transposés en déplacement radial (DR) et tangentiel (DT) selon une convention propre à chaque type d'ouvrage.

- sous forme numérique :

Le listing fait apparaître les déplacements mesurés DR, DT, DZ en cumulé par rapport à la mesure origine.

- Sous forme graphique :

Aucune représentation graphique n'est réellement satisfaisante car pour être complète, elle devrait être établie en quatre dimensions. Aux DR, DT, DZ venant s'ajouter dt, intervalle de temps entre les mesures. Il ajoute l'information relative à la vitesse du déplacement. Il n'y a pas de représentation type du fait de l'évolution des besoins dans la vie de l'ouvrage.

Pendant la période d'essai de l'ouvrage, on préfère une représentation d'ensemble des repères (fig. 30).

En phase exploitation de l'ouvrage, pour sa surveillance, on préfère une représentation point par point avec en abscisse le facteur temps (fig. 31).

IV.2.8 Analyse de l'ouvrage

Un ouvrage se déforme sous l'effet de phénomènes connus et réversibles tels que la pression de l'eau, la température, ou par exemple l'effet du vent sur un réfrigérant, mais aussi sous l'effet de phénomènes irréversibles tels que le retrait du béton ou le tassement de la fondation. Durant toute la vie de l'ouvrage, contrairement à certains pays et à une majorité de bureaux d'études qui ont tendance à faire des comparaisons statiques à une note de calculs, le contrôle des ouvrages en exploitation est orienté vers la recherche de la connaissance des évolutions irréversibles. L'analyse des premières mesures va consister à établir un rapport entre le gradient de déplacement par rapport à un gradient de sollicitation. Après quelques opérations, un premier modèle mathématique est établi par calculs sur ordinateur selon la méthode des éléments finis pour connaître les lois de variation de chaque point de mesure sous l'effet des contraintes et de la température. Par la suite, on peut transformer une mesure brute en mesure corrigée de ces effets. Périodiquement, un nouveau modèle mathématique est recalculé en tenant compte de l'ensemble des données antérieures. L'originalité de cette méthode est que la sécurité est appréciée par rapport au comportement antérieur de l'ouvrage qui fournit ainsi, en quelque sorte, ses propres éléments d'analyse.

BARRAGE DE GRAND-MAISON

Point : 30187

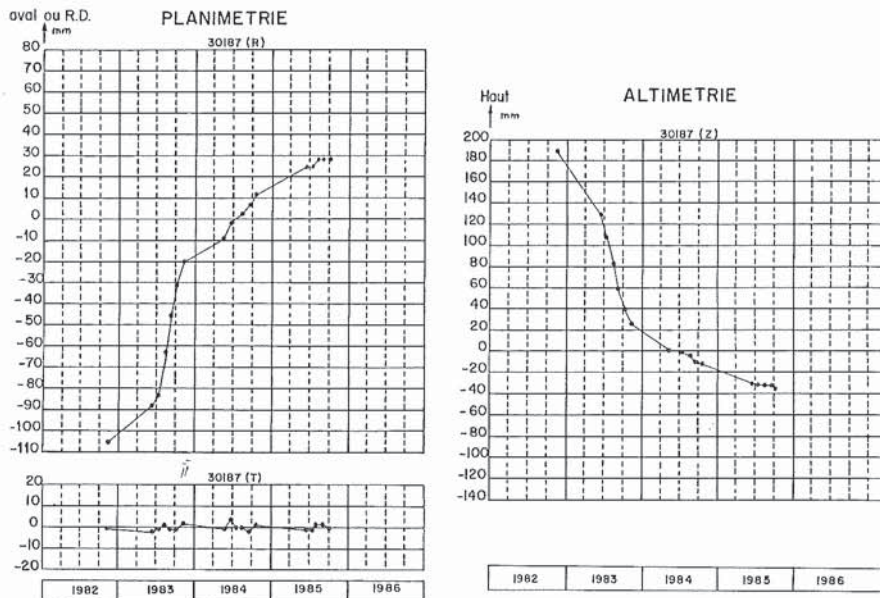


Fig. 31

V. Conclusion

L'auscultation met en œuvre beaucoup de moyens pour vérifier en permanence les divers paramètres concourant à la stabilité d'un ouvrage. Elle constitue donc un moyen important de prévention des risques technologiques. Dans cet ensemble, la topographie apporte une part importante, notamment pour tout ce qui concerne

les déplacements et déformations des ouvrages. Les méthodes topographiques sont toujours précises, sûres, fiables : on peut leur reprocher quelquefois leur lenteur et l'obligation d'être réalisées uniquement par des spécialistes. L'automatisation de la mesure et des calculs réduit progressivement cette dernière objection. Pour le reste la pérennité de ces méthodes constitue le meilleur critère de leur valeur.