

P24

**PROCEEDINGS. 4th INTERNATIONAL CONGRESS
INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY
INDIA—1982**

**PROCEDES. 4eme CONGRES INTERNATIONAL
ASSOCIATION INTERNATIONALE DE GEOLOGIE DE L'INGENIEUR
INDE—1982**

REPRINT

**NEW DELHI
10-15 DEC. 1982**

DETERMINATION IN SITU DES PROPRIETES DYNAMIQUES DU ROCHER POUR LES PROJETS DE CENTRALES NUCLEAIRES

IN SITU DETERMINATION OF DYNAMIC ROCK PROPERTIES FOR NUCLEAR POWER PLANT PROJECTS

YVES BERTRAND

Compagnie de Prospection
 Geophysique Francaise
 Rueil-Malmaison, France

PIERRE DELETIE

Electricite de France
 Paris, France

ALAIN PECKER

Mecasol
 Paris, France

CLAUDE BORDET

Electricite de France
 Paris, France

JACQUES LAKSHMANAN

Compagnie de Prospection
 Geophysique Francaise
 Rueil-Malmaison, France

JACQUES SIGISMOND

Electricite de France
 Paris, France

ABSTRAIT

Les études du risque sismique préalables à la construction de douze centrales nucléaires françaises ont permis de développer et d'améliorer les techniques de détermination des paramètres dynamiques des sols (modules de Young, de cisaillement et coefficient de Poisson) à partir des vitesses sismiques des ondes longitudinales et des ondes transversales. Pour parvenir à des résultats fiables, on a été amené à développer :

- les méthodes et l'instrumentation permettant de créer simultanément des efforts de cisaillement et des efforts de compression.
- la recherche et la mise au point de systèmes de réception et de séparation de ces deux types d'ondes.

Les nouveaux enregistreurs digitaux à haute résolution ont permis de réaliser des mesures avec 12 ou 24 capteurs sur des bases très courtes. Dans la méthode du "cross hole" horizontal, un petit espacement entre émetteur et capteur permet d'éviter des réfractions parasites. Un nouveau système par frappe autonome privilégie l'onde transversale et permet la répétition des expériences. L'onde longitudinale apparaît par sommation de coups répétés. Les mêmes mesures dans la direction verticale ("down hole" et "up hole") permettent de prévoir les effets de sollicitations venant du tréfonds. Lors de

ABSTRACT

During earthquake engineering studies of twelve French nuclear power plants, in situ measurement techniques of dynamic soil properties (longitudinal and transverse seismic velocities, Young's modulus, shear modulus, Poisson's coefficient) have been developed and updated. To obtain viable and accurate results, instruments and techniques have been evolved to efficiently transmit shear and compressional waves, as well as to receive and to differentiate these two waves. With new high resolution digital recorders, 12 or 24 channel measurements can be made even with very short spacings. In the horizontal "cross-hole" technique, a short distance between transmitter and receiver avoids parasite refractions. A new down hole hammer system creates high shear wave energy. The compressional wave shows out well after stacking several blows. Similar measurements in vertical directions ("down hole" and "up hole") simulate earthquakes coming up from deeper layer of the crust. During "down hole" measurements, the use of hydrophones allows recording of "tube" waves, whose velocities are close to those of shear waves. Lastly, with an iterative computation method, seismic panels or large cross holes can be used, with spacings up to twice the drill hole length. The method takes into account curved ray paths, and supplies a complete map of velocities. These various in situ techniques supply dynamic parameters to the engineer calculating soil-structure behaviour, and supply detailed geological information to the geologist, concerning stratigraphy and location of anomalies.

l'opération "down hole", l'utilisation d'hydrophones permet également de mesurer la vitesse des ondes de tube, en corrélation avec la vitesse des ondes transversales. Enfin, une technique de calcul itératif permet de réaliser des panneaux sismiques, où les forages sont écartés jusqu'à deux fois leur longueur ; elle prend en compte la courbure des rayons et fournit une carte complète de vitesses entre les deux forages. Cet ensemble d'essais in situ présente le double intérêt de fournir à l'ingénieur les éléments du calcul sol-structure, et au géologue, les éléments lui permettant de préciser ses connaissances sur la succession lithologique et sur la position d'anomalies.

1. Préambule

L'insertion d'une centrale de production d'électricité nucléaire dans le tissu socio-économique d'un pays industrialisé pose de redoutables problèmes de sûreté.

Sûreté des installations contenues dans les bâtiments, et des personnes y travaillant, comme pour toutes constructions industrielles, mais avec le souci particulier lié à l'importance du risque en cas de défaillance et au coût de celle-ci : une "tranche" de 1300 MW coûte en France, en 1981, environ 4,5 milliards de francs (soit de l'ordre de 1000 millions de dollars US).

Il y a par ailleurs des problèmes spécifiques liés au programme nucléaire français : la standardisation. Le programme en effet prévoit la répétitivité des "tranches" (ensemble de bâtiments, relativement autonomes, assurant la production) de conception unique, calculées a priori, mais posées sur des sols tels que la nature les fournit et que les contraintes socio-économiques imposent.

Parmi les nombreux bâtiments et ouvrages constituant une "tranche" nucléaire, nous distinguerons ceux formant l'îlot nucléaire (bâtiment du réacteur, bâtiment du combustible, bâtiment des auxiliaires nucléaires,...) contenant et/ou ayant entre eux des fonctions nucléaires, des autres ne présentant pas de risques de pollution spécifiques ; les premiers font l'objet de réglementations spéciales quant à leur tenue aux sollicitations externes, comme les secousses sismiques par exemple.

Le site, une fois choisi, devient pour le projeteur, une donnée dont il faut expliciter les valeurs caractéristiques nécessaires aux calculs de stabilité des ouvrages définis par ailleurs.

Concourent à cette quête : géologues, hydrogéologues, géophysiciens et mécaniciens des sols.

La détermination du niveau sismique à prendre en compte, dans le cadre des textes réglementaires, incombe principalement aux géologues.

Pour juger du degré d'hétérogénéité du sol le géophysicien apporte au géologue une vue par "transparence" qui permet à ce

dernier de mieux comprendre et relier entre elles les informations fournies par les sondages mécaniques et autres méthodes d'investigations ponctuelles.

La qualité des terrains est déterminée par le mécanicien des sols à l'aide de l'interprétation des données brutes fournies par les diverses investigations et/ou par des essais de laboratoire effectués sur des échantillons prélevés dans le sol.

2. Les calculs sismiques

2.1. Généralités

Une particularité liée aux centrales nucléaires est la nécessité réglementaire de la prise en compte des calculs transitoires dans la détermination des efforts générés pendant les séismes.

Dans le cadre des radiers des bâtiments de l'îlot nucléaire, et tout particulièrement pour celui du bâtiment du réacteur, les méthodes employées pour évaluer les interactions dynamiques sol-structures se rangent dans deux catégories : méthodes globales et méthodes de sous-structures.

Les méthodes globales consistent à prendre en compte l'ensemble : structure, sa fondation et le sol. Le mouvement simulant l'ébranlement sismique est imposé en champ libre suffisamment éloigné de la structure. On utilise cette méthode généralement en liaison avec celle des éléments finis.

Les méthodes des sous-structures traitent séparément la partie structure et la partie sol de fondation. Les différentes étapes nécessaires pour traiter le problème complètement sont les suivantes : la réponse du site est déterminée par la connaissance du mouvement en chaque point du sol ; l'importance du mouvement diffracté est déterminée par la prise en compte de la raideur de l'interface sol-structure ; l'impédance de la fondation est déterminée en prenant en compte les caractéristiques dynamiques concernées, la raideur et l'amortissement du sol. Les réactions que le sol apporte à la structure sont alors déterminées par une analyse dynamique.

Des simplifications permettent l'aboutissement des calculs pour lesquels la détermination d'un couple unique : module de

cisaillement/coefficient de Poisson est nécessaire. Un "module équivalent" à l'ensemble de ceux des couches de sol constituant le terrain réel de fondation est déterminé comme celui d'un demi espace homogène conduisant aux mêmes déplacements.

2.2. Représentation du sol

Les calculs sismiques des bâtiments sont effectués en représentant le sol par un système de raideurs et d'amortissements agissant en translation, en rotation et si nécessaire en torsion. Les valeurs des raideurs et amortissements ont été établies par DELEUZE (1967) avec les hypothèses suivantes :

- le sol est assimilé à un milieu semi-infini, homogène, et isotrope. Son comportement est supposé élastique et linéaire.
- la surface de contact avec le sol est supposée plane ; elle est une partie du plan qui limite le sol. On admet que la fondation est rigide et que sa surface de contact reste plane et subit un déplacement d'ensemble.
- pour trouver une solution approchée, il est choisi une répartition de contraintes sous la fondation.

L'hypothèse faite sur l'homogénéité est rarement vérifiée : les sols sont la plupart du temps stratifiés et leurs propriétés mécaniques varient avec la profondeur.

Les développements récents des méthodes de calcul d'interactions sol - structure permettent de prendre en compte les différentes couches du sol, avec leurs propriétés mécaniques, en supposant un comportement linéaire. Une telle approche est délicate et lourde et ne se justifie actuellement que pour des cas particuliers.

Le comportement supposé linéaire et élastique est critiquable, mais admis pour de faibles déformations. Certains codes de calcul permettent de prendre en compte des propriétés mécaniques compatibles avec le niveau de déformations et obtenues par itérations, mais restent dans le domaine élastique. Ils peuvent être utilisés pour obtenir un profil de modules compatibles avec les distorsions et le niveau de séisme envisagés.

2.3. Notion d'équivalence

Les sols homogènes dits équivalents de module E_{eq} donnent, pour des efforts identiques, les mêmes déplacements au niveau de la fondation que le sol multicouche selon les sollicitations envisagées. Il y a autant de modules équivalents que de sollicitations.

Pour une sollicitation donnée, le déplacement de la fondation provient de

la répartition des contraintes $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ avec la profondeur. Ces répartitions sont données, pour une fondation circulaire de rayon r_0 par exemple, en fonction de Z/r_0 , d'où une dépendance très forte du module avec les couches sollicitées et le rayon de la fondation.

Pour un sol homogène, les répartitions des contraintes, des déformations, des déplacements en tout point du demi-espace ont été calculées par différents auteurs.

Pour la détermination d'un module équivalent, l'hypothèse de base est que la répartition des contraintes reste la même, que le sol soit homogène ou non. On constate d'ailleurs que certaines contraintes s'expriment de manière indépendante des propriétés mécaniques E et ν du sol.

Ce sont en fait ces contraintes qui représentent le mieux les sollicitations et dont l'effet est le plus important.

Pour une sollicitation donnée, le déplacement de la fondation sur un sol multicouche est obtenu en sommant les déformations de chaque couche.

Par comparaison avec le déplacement d'un sol homogène, on en déduit le module recherché.

3. Méthodes de détermination des paramètres dynamiques

3.1. Généralités

Les modules dynamiques étant reliés aux vitesses sismiques des ondes longitudinales et des ondes transversales, leur détermination se fait par des essais sismiques simples. On peut distinguer trois échelles dans cette détermination :

a. Echelle de l'échantillon, essais en laboratoire

La détermination des vitesses sismiques dans ces conditions est connue depuis longtemps. Elle présente certains inconvénients :

- la longueur des échantillons nécessairement faible conduit à des mesures de temps relativement très imprécises.
- l'échantillon est nécessairement exempt de fractures importantes.
- le prélèvement des échantillons par carottage est onéreux.
- les contraintes naturelles du sol sont difficiles à reconstituer au cours des essais.

b. Echelle du massif - Prospection sismique classique de surface

Parallèlement à la détermination de la géométrie d'un massif par analyse des divers trajets des ondes sismiques longitudinales, on peut imaginer une recherche de la vitesse des ondes transversales à

l'échelle de la centaine de mètres.

De tels essais ont déjà été effectués avec des réussites très variables, et en général très discutables. Les difficultés auxquelles on se heurte sont les suivantes:

- la source d'ébranlement qui permet de reconnaître des signaux à grande distance doit être très énergétique, d'où l'emploi du tir à l'explosif qui, s'il peut créer une énergie longitudinale importante pourvu que les quantités utilisées soient grandes, ne génère pas en général d'énergie transversale suffisamment intense pour être reconnue sans ambiguïté. Il y a une contradiction entre l'obtention d'un signal longitudinal et d'un signal transversal qui soient tous deux nets.

On a pu cependant, avec les enregistreurs digitaux modernes, faire des progrès assez notables dans ce sens, en particulier par la sommation des signaux qui permet la mise en oeuvre d'une source moins puissante mais plus favorable à la génération des ondes sismiques transversales, et par la séparation des divers signaux par filtrage des fréquences.

- à grande échelle, les terrains étudiés ne sont pas homogènes. On sait que lorsqu'une onde sismique rencontre chaque surface de discontinuité, il se crée quatre ondes qui se réfractent et se réfléchissent, deux longitudinales et deux transversales. C'est ainsi que la première arrivée est celle de l'onde longitudinale, et qui est restée longitudinale pendant tout le trajet. Les autres arrivées peuvent résulter de trajets très complexes, au cours desquels on ne peut affirmer ni quelles ont été les natures des propagations, ni à quelle couche de terrain la vitesse apparente pourrait être affectée.

c. Echelle de la dizaine de mètres

C'est actuellement l'échelle la plus utilisée. Elle élimine les principaux désavantages signalés plus haut :

- on peut alors considérer le terrain comme homogène dans la direction horizontale. Les valeurs obtenues sont des valeurs moyennes à l'échelle de la structure étudiée.
- la distance émission-réception est suffisamment petite pour que soient choisies des sources d'ébranlement peu énergétiques comme les chocs, mais qui ont l'avantage de créer préférentiellement des ondes transversales.
- de plus, la courte distance permet que l'on soit à peu près sûr de la propagation en ligne droite du signal.

- un inconvénient subsiste, celui de la nécessité de disposer de deux forages pour expérimenter en transmission directe à diverses profondeurs.

Ces méthodes appelées "cross hole", "down hole" et "up hole" permettent de déterminer divers modules dynamiques et le coefficient de Poisson entre deux forages.

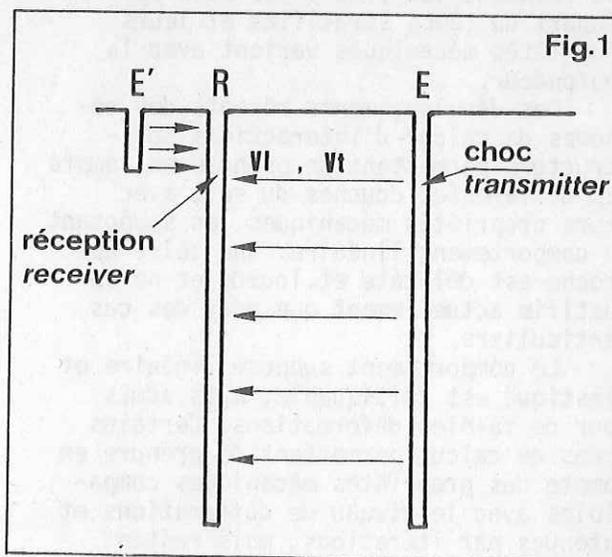
Méthode "cross hole" : on détermine ces paramètres suivant la direction horizontale.

Méthode "up hole" et "down hole" : on détermine ces paramètres suivant la direction verticale.

3.2. Dispositifs de mesure

a. "Cross hole"

On mesure entre deux points à la même cote, à partir de deux forages, l'un forage d'émission E, l'autre forage de réception R, les vitesses de transmission des ondes longitudinales et des ondes transversales. Cette opération se fait depuis le sommet des forages jusqu'à la profondeur maximum désirée.



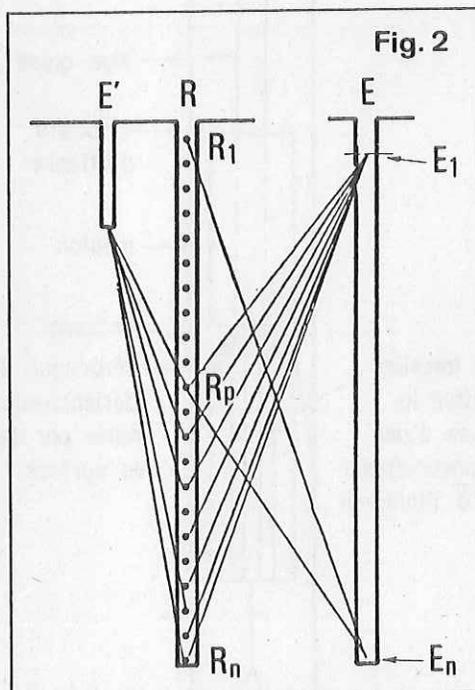
On exécute ainsi, que ce soit par frappe sur un train de tige ou par un système de frappe autonome (voir paragraphe 3), toute une série de mesures à diverses profondeurs.

Le pas de mesure et la profondeur maximum dépendent du problème posé. Généralement, les mesures superficielles sont faites à un pas plus serré que les mesures profondes, en raison de la plus grande diversité des terrains superficiels. Etant donné

qu'on doit s'affranchir de réfractations parasites, la distance entre forages E et R doit être d'autant plus faible que la variation lithologique avec la profondeur est rapide. Pour les mesures superficielles, on est amené quelquefois à forer un trou supplémentaire peu profond, tel que la distance émission-réception soit plus faible (3 à 5 mètres au lieu de 10 à 15 mètres).

b. "Down hole" et "up hole"

On réalise de même des mesures entre forages de façon à ce que les trajets soient verticaux ou sub-verticaux. Si le sens émission-réception est de haut en bas, on réalise un "down hole". Dans le cas contraire, il s'agit du "up hole".



On peut utiliser les forages qui servent à exécuter le "cross hole", si ce dispositif conduit à avoir des rayons sismiques à peu près verticaux. On peut par exemple émettre en un point fixe E1 et réceptionner les trajets sismiques en positionnant le capteur entre Rp et Rn. La position de Rp dépend de la tolérance qu'on admet en ce qui concerne la non verticalité des rayons. On peut également émettre dans un autre forage E' plus près de R qui assure des trajets plus verticaux et qui permet de continuer l'expérimentation plus haut que le point Rp. Il s'agit ici du "down hole". On émet également en un autre point fixe En et on réceptionne les rayons sismiques par des capteurs situés entre R1 et Rp. Il s'agit alors du "up hole".

c. Carottage sismique

On accompagne les essais de "cross hole", "down hole" et "up hole" de "carottages sismiques". On émet un signal (choc ou faible quantité d'explosifs) au fond et au sommet d'un forage dans lequel on dispose des hydrophones ou des capteurs plaqués à la paroi du tubage. On obtient alors un log de vitesses sismiques du forage, en traçant sur un graphique les temps d'arrivée en fonction de la profondeur.

Ce dispositif sert essentiellement pour l'obtention d'arrivées longitudinales de bonne qualité, les systèmes précités favorisant les ondes transversales. Dans certains cas, le dispositif avec hydrophones permet d'obtenir des arrivées tardives dites "ondes de tube" qui se propagent à une vitesse de l'ordre de 90 % de la vitesse transversale. (F. HENNING et al, 1981).

On peut également utiliser un dispositif court, où l'émetteur de chocs est séparé d'un mètre du récepteur, ou de préférence, de 2 récepteurs écartés d'un mètre. Cette méthode est appelée improprement "log sonique". Ce terme doit être réservé au dispositif pétrolier où la longueur émetteur-récepteur est encore plus courte, et où l'émission se fait de façon continue à l'aide d'une céramique. Les résultats obtenus sont très détaillés mais ne donnent pas de vitesses absolues, en raison de l'incertitude sur le temps zéro et sur le pointage du temps de transmission émetteur-récepteur (pointage des phases).

d. Contraintes sur les forages

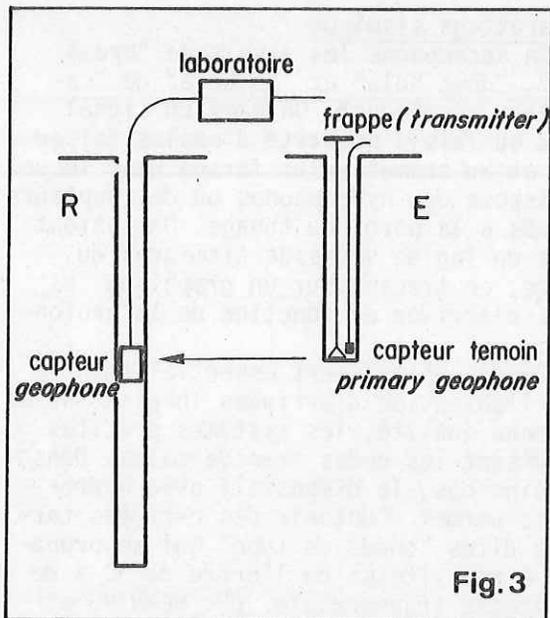
On verra que les nécessités de l'émission et de la réception obligent à disposer de trous d'un diamètre minimum. Les forages doivent être tubés en PVC. Les appareils disponibles nécessitent actuellement un diamètre minimum de 72 mm. L'espace annulaire doit être cimenté pour assurer un bon couplage terrain-tubage. Les forages doivent être soumis à des mesures d'inclinométrie pour connaître avec précision la distance émission - réception.

3.3. Source de l'ébranlement

On utilise la méthode par frappe qui permet de créer des ondes longitudinales et des ondes transversales.

a) Méthode à l'avancement

Dans le cas du cross hole, le forage de réception est foré jusqu'à la profondeur maximum à laquelle on désire exécuter l'expérimentation.

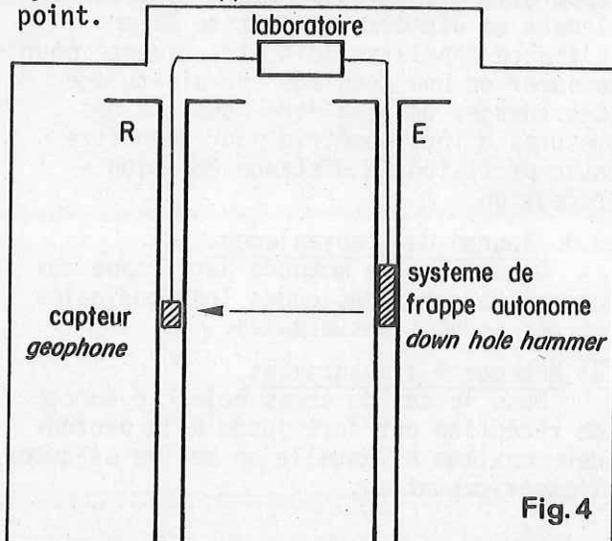


Le forage d'émission est arrêté à la profondeur à laquelle on désire opérer. L'ébranlement créé par le choc sur le haut du train de tige est transmis au terrain par l'outil qui repose au fond de l'orifice. Le signal est enregistré par le capteur situé au même niveau dans R. Pour l'expérimentation suivante, on reprend le forage E jusqu'à la cote voulue et on descend le capteur à cette même cote dans R.

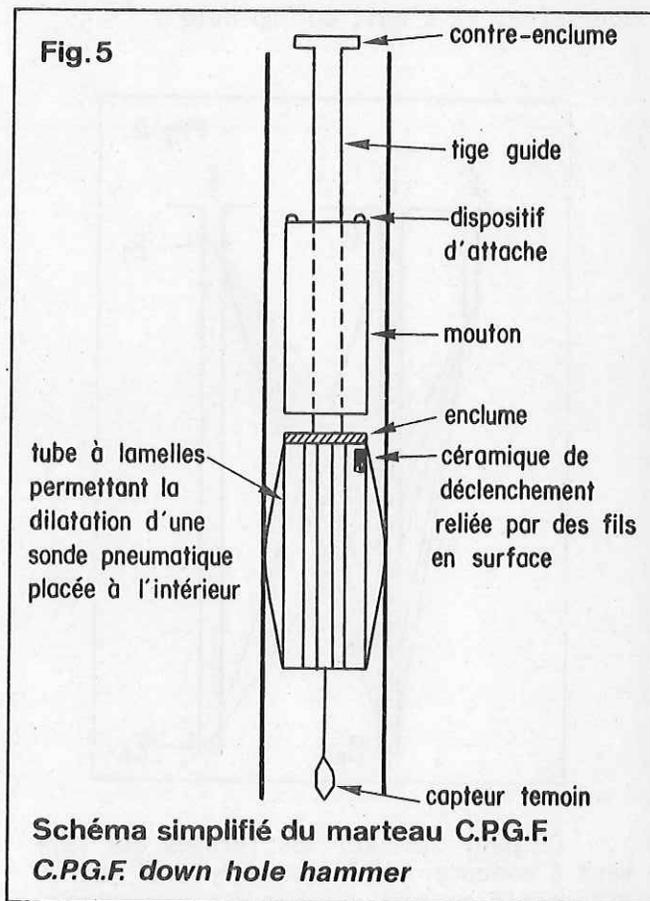
Pour éviter toute erreur dans la mesure des temps, il est indispensable de descendre un capteur témoin au fond du forage E.

b) Méthode par frappe autonome

Pour éviter d'immobiliser ainsi un atelier de sondage pendant toute la durée de l'expérimentation et éviter de même d'immobiliser l'équipe de mesures pendant la durée des forations successives, un système de frappe autonome a été mis au point.

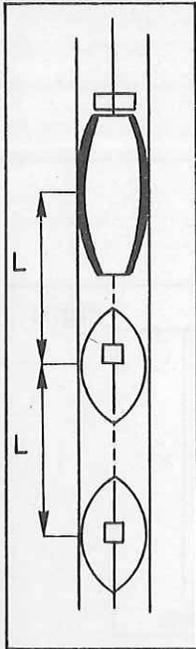


Un tube métallique à lamelles d'environ 110 cm de longueur contient une cellule gonflable à l'air ou à l'azote comprimé. La mise en pression du gaz plaque les lamelles contre les parois du forage. Ce tube est surmonté d'une tige guide qui permet à une masselotte métallique de coulisser et de produire des chocs par gravité au sommet du tube. Le choc est ainsi transmis au terrain, la source étant supposée se situer au milieu du tube. Le système étant de symétrie cylindrique, une rotation de l'émetteur (descendu par câble) n'est pas gênante vis-à-vis du récepteur (lui-même symétrique), contrairement à un système à 2 ou 3 mâchoires.



Ce système est muni des dispositifs suivants :

- dans la partie supérieure du tube, tout près du point de frappe, un capteur céramique, sous l'action du choc, déclenche l'enregistrement. Ce déclenchement est sensé se faire exactement à l'instant de la frappe. On s'est aperçu, en raison des temps très faibles qu'on est amené à mesurer, que l'écart entre l'instant de la frappe et l'instant de déclenchement de l'enregistreur ne pouvait pas être considéré comme nul. Pour avoir une meilleure définition du temps zéro, on a mis au point le système suivant :



On dispose un ou deux capteurs (plaqués à la paroi dans le cas où le trou est hors nappe, des hydrophones dans le cas contraire) sous la cellule gonflable et reliés à celle-ci par une chaînette métallique. Ces capteurs envoient au laboratoire le signal produit par le choc de la masselotte, aux instants θ_1 et θ_2 , l'instant de déclenchement étant $2\theta_1 - \theta_2$. Avec un seul capteur à la distance l du point de frappe l'instant de la frappe est :

$$\theta_1 - \frac{l}{V}$$

V vitesse verticale du terrain, connue par les divers essais effectués. L'erreur sur le temps zéro est alors inférieure à 0,1 millisecondes (avec $L = 1m$).

Il faut noter que par rapport à la direction de propagation, l'effort transmis est plutôt un effort de cisaillement du terrain, davantage que dans le cas de la frappe sur un train de tige.

c) Avantages et champs d'application de la frappe autonome

Elle est particulièrement intéressante en raison de la sûreté que l'on a dans la détermination des ondes transversales dont la reconnaissance avait toujours posé quelques problèmes.

Parmi les autres avantages, signalons qu'on peut inverser le sens de choc en frappant une contre enclume vers le haut. Suivant le type d'essai et le sens du choc, on peut inverser le signal de telle onde sismique et par là, reconnaître à coup sûr les ondes transversales dans les cas douteux.

Enfin, le système autonome présente l'avantage fondamental qu'on doit attendre de toute expérimentation en sciences physiques, qui est la répétitivité. On peut en effet revenir sur un site et refaire les essais à plusieurs mois d'intervalle sans mobiliser une équipe de sondage et dans des conditions rigoureusement identiques.

Le champ d'application de cette méthode est alors très large :

- en "cross hole", méthode pour laquelle le système de frappe autonome a été mis au point.
- en "down hole", la frappe autonome permet de choisir plusieurs points fixes de choc, en particulier au fond d'un forage et de réaliser un essai "up hole". On a ainsi, quels que soient les points de réception, des trajets sub-verticaux et des distances émission-réception, qu'on peut choisir

faibles pour bénéficier d'un signal assez énergétique.

Avec des trajets de diverses inclinaisons dans un même type de terrain, une régression elliptique ($V^2 = f(\cos^2 \varphi)$) permet de calculer plus correctement V_{TH} , V_{TV} , V_{LH} , V_{LV} .

d) Contrôle du système de frappe autonome

Lors de la première étude, réalisée par C.P.G.F. à l'aide de ce dispositif, deux séries de mesures de cross hole classique ont été reprises avec le système autonome.

Le cross hole classique était réalisé avec un capteur témoin au fond du forage d'émission et un capteur tridirectionnel de réception. La frappe autonome, dans cette première expérience, était réalisée avec céramique de déclenchement, mais sans capteur de référence. Après étalonnage en laboratoire, les temps mesurés avec la frappe autonome étaient augmentés de 1,1 ms. Après cette correction, l'écart moyen sur une série de mesures de V_L et de V_T était de 4 à 5 %. Pour améliorer cette précision, nous avons ensuite ajouté un capteur de réponse sous l'émetteur. Avec ce dispositif un étalonnage n'est plus nécessaire.

Il faut noter que ces diverses techniques telles que développées en France, se comparent très favorablement avec celles en usage aux Etats-Unis, et décrites dans l'ouvrage de M.L. SILVER et al, 1978.

3.4. Réception

a) Principe

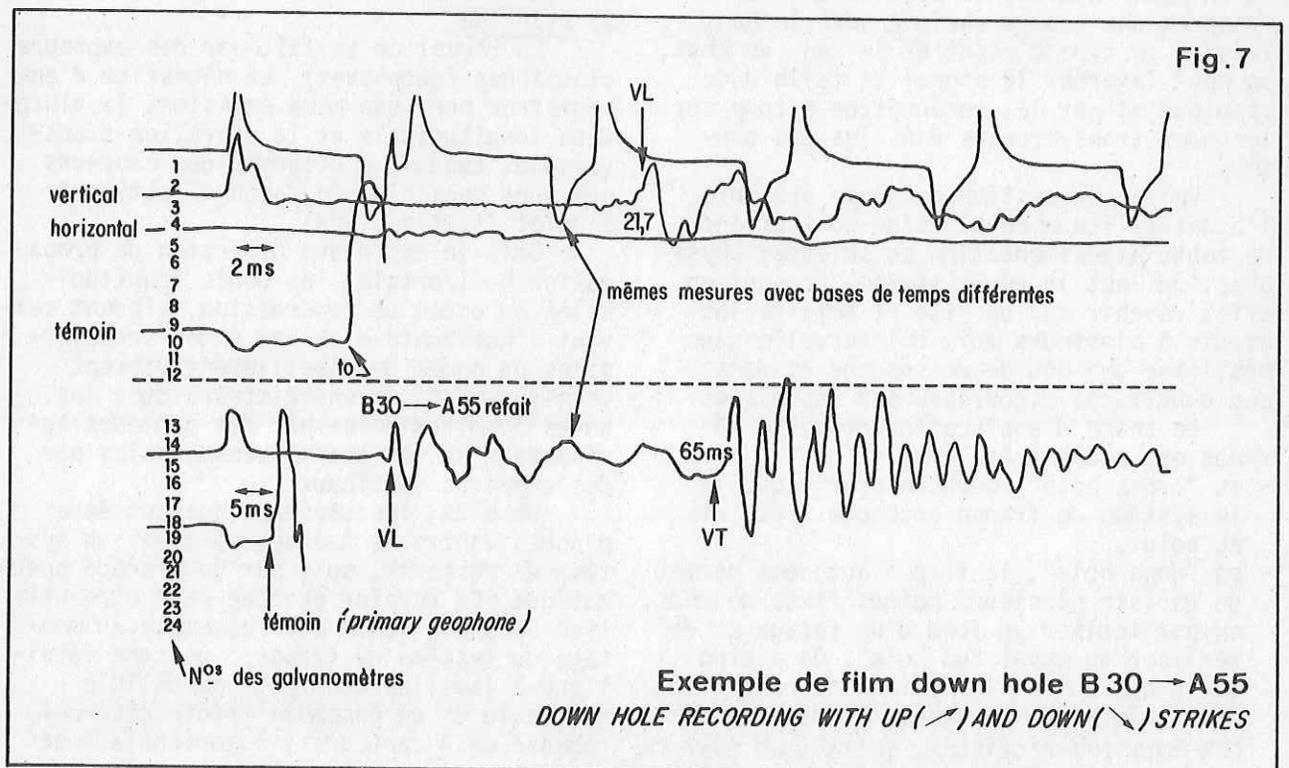
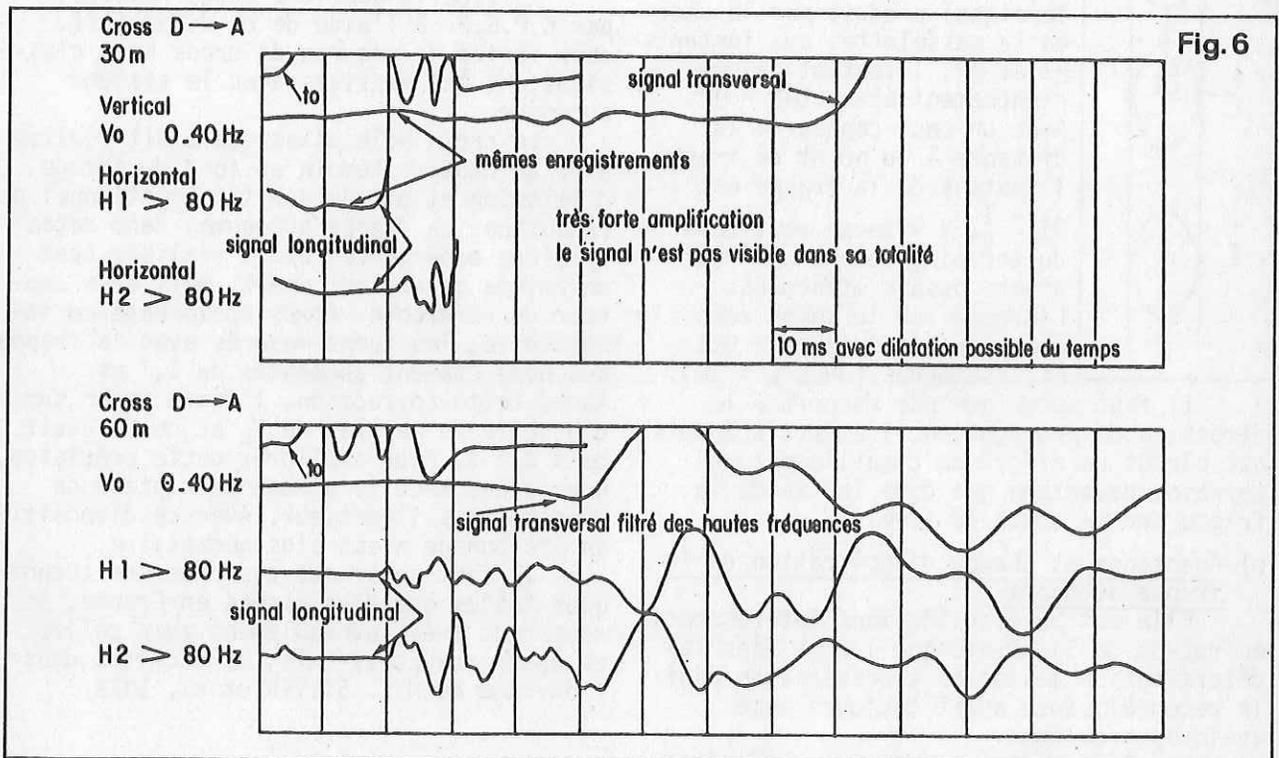
La réception se fait par des capteurs classiques (géophones). La nécessité d'enregistrer pour une même émission, la vibration longitudinale et la vibration transversale, conduit à disposer des capteurs qui sont sensibles de façon sélective à l'un et l'autre signal.

Dans le cas d'une direction de propagation horizontale, les ondes longitudinales ou ondes de compression, vibrent suivant l'horizontale et les ondes transversales ou ondes de cisaillement vibrent verticalement. On enregistrera donc les ondes longitudinales par des capteurs horizontaux et les ondes transversales par des capteurs verticaux.

De plus, les capteurs doivent être plaqués contre le tubage, soit par un système de ressorts, soit par un procédé pneumatique. Ce dernier procédé peut être utilisé avec une sonde qui ressemble au montage du système de frappe : un tube métallique à lamelles contient une cellule gonflable et un ensemble tridirectionnel composé de 3 capteurs : 2 horizontaux et

1 vertical. La mise en pression de la cellule ainsi plaquée au tubage assure un très bon couplage terrain - capteurs.

La fréquence de résonance des capteurs utilisés est suivant les fabricants, comprise entre 10 et 50 Hz (au-dessus de ces fréquences, la réponse est théoriquement linéaire).



b) Dispositifs de réception

On peut mettre en place 3 dispositifs :

* Un groupe de 3 capteurs tridirectionnels constituant un ensemble d'enregistrement à une cote bien déterminée. On enregistre ainsi les temps de trajets émission - réception point par point. Ce dispositif présente l'avantage d'une grande facilité de mise en oeuvre. Il peut présenter un inconvénient lorsqu'on n'utilise pas un dispositif émetteur qui donne l'instant initial de frappe avec sûreté. En effet, il peut alors se faire que le temps émission-réception soit entaché, en plus de l'erreur de lecture du temps sur le film, d'une erreur sur le temps zéro. Si ces deux erreurs s'additionnent, les vitesses, sur des bases courtes, sont très imprécises.

* Deux groupes de capteurs dans le même forage : pour une même émission, on enregistre à deux niveaux différents avec 2 capteurs ou 2 groupes de capteurs. L'erreur sur le temps zéro est ainsi éliminée. La vitesse entre A et B est donc égale à :

$$\frac{x_B - x_A}{t_B - t_A}$$

Cette méthode est celle qu'on utilise avec 12 hydrophones pour les carottages sismiques. Pour les essais "down hole" et "up hole", la nécessité d'avoir en 2 points 3 capteurs tridirectionnels plaqués à la paroi, rend cette méthode assez lourde. Cela conduit certains utilisateurs à sacrifier la qualité de la liaison capteurs-terrain, c'est-à-dire la qualité de l'enregistrement.

* Deux groupes de capteurs dans 2 forages (cross hole) : on peut réceptionner le signal en deux points situés à la même cote dans 2 forages différents.

On élimine par cette méthode toute incertitude sur le temps zéro. Seule subsiste l'erreur sur la lecture des temps d'arrivée. Si l'erreur maximum sur le temps zéro est inférieure à l'erreur sur les temps d'arrivée, cette méthode (compte-tenu du forage supplémentaire qu'elle demande) ne présente pas d'intérêt.

3.5. Enregistrements

Le signal transmis aux capteurs est enregistré par un laboratoire sismique. Ce laboratoire peut être un laboratoire sismique utilisé pour les prospections de sismique réflexion classiques ou un enregistreur digital à sommation des signaux.

a) Laboratoire sismique classique

Il comprend les étages d'amplification et la caméra équipée de 12 ou 24 galvanomètres. Une émission correspond automatiquement à la production d'un film. Le déroule-

ment le plus rapide des films permet un pointage des temps qui ne peut être meilleur que 0,2 à 0,5 ms.

b) Oscilloscope

Il permet la mesure de temps avec une grande précision absolue (jusqu'à 0,01ms), à condition qu'ils soient courts. La précision relative n'est pas meilleure que 1 ou 2 %. Habituellement, on ne dispose que d'un ou de deux canaux.

c) Laboratoire sismique digital à mémoires

Il permet de sommer les chocs et par conséquent, d'améliorer le rapport signal/bruit, ce qui se révèle particulièrement intéressant lorsque, comme c'est le cas pour la frappe, l'énergie transmise est faible.

De tels laboratoires sont ainsi constitués :

- 12 ou 24 canaux. Ils permettent par conséquent d'enregistrer en même temps tous les temps intéressants pour le calcul des vitesses sismiques. C'est un avantage décisif sur les oscilloscopes qui n'ont en général pas plus de 2 voies. Un laboratoire à 12 canaux permet d'enregistrer :
 - . sur 2 ou 3 canaux, les signaux relatifs au temps initial.
 - . un canal peut être réservé à un capteur témoin
 - . les 3 capteurs d'enregistrement du signal peuvent être branchés sur 6 canaux avec deux amplifications d'entrée différentes.
- un écran de visualisation qui permet de suivre et contrôler l'amélioration du signal et d'arrêter la succession des frappes lorsque les amplitudes des signaux recherchés sont suffisantes pour une bonne reconnaissance et une détermination précise des temps.
- deux étages d'amplification pour chaque canal :
 - 1 amplification d'entrée
 - 1 amplification de sortie
- un étage de filtres.
- un système de dilatation des temps qui permet sur les films de pointer de 0,020 à 0,050 ms près, ce qui conduit à une précision de lecture des temps de 0,050 à 0,100 ms, quel que soit le temps total. La précision relative croît avec le temps mesuré (pour 10 ms : < 1%, pour 50 ms : 0,2%).
- une caméra qui reproduit sur papier l'image de l'écran de visualisation.
- un système de conservation sur cassette.

3.6. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats en ce qui concerne la détermination des paramè-

tres dynamiques et non leur traitement, est très simple.

a) Cross hole

On dispose d'une distance émission-réception et des deux temps correspondants, lus sur les films, t_T et t_L , d'où les valeurs des vitesses horizontales

$$V_L = \frac{x}{t_L} \quad V_T = \frac{x}{t_T}$$

b) Down hole et up hole

On utilise deux méthodes :

1) Méthode globale

Entre le point d'émission et le point de réception, les distances et les temps correspondants donnent les vitesses longitudinales et transversales verticales moyennes le long du trajet du rayon sismique.

2) Méthode différentielle

Entre deux positions de capteurs de numéro d'ordre n et p, correspondant à des distances x_n , x_p et des temps t_n , t_p , on peut calculer les vitesses verticales entre les points N et P.

$$V = \frac{x_n - x_p}{t_n - t_p} \text{ en temps longitudinal et en temps transversaux}$$

On peut choisir deux points voisins, ou deux points relativement éloignés, pour avoir soit des vitesses représentatives d'une couche d'épaisseur faible, soit des vitesses représentatives d'une couche d'épaisseur plus grande. On peut également calculer les vitesses d'une succession d'intervalles correspondant à des positions voisines du capteur et faire une moyenne des vitesses, afin de lisser au mieux les erreurs.

c) Expression des paramètres dynamiques

Coefficient de Poisson

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \right)$$

nombre sans dimension

Module de cisaillement μ ou G =

ρV_T^2 exprimé en bars ou mégapascals

Module de Young $E = 2\rho V_T^2 (1 + \nu)$

exprimé en bars ou mégapascals.

avec V_L vitesse longitudinale en m/s

V_T " transversale en m/s

ρ masse spécifique en Kgm/m^3

Le résultat est alors exprimé en pascals.

3.7. Fiabilité et précision des résultats

L'expérience montre qu'on est amené à faire des erreurs de deux types.

(a) Erreurs dues à la reconnaissance des signaux

Ces erreurs ne sont pas quantifiables, mais à la suite d'une expérimentation sérieuse, elles sont très peu probables.

Les signaux les plus délicats à reconnaître sont les arrivées longitudinales en cross hole et les arrivées transversales en down hole. Elles sont peu énergétiques. On évite cependant de confondre ces arrivées avec un bruit :

- d'une part, en observant l'augmentation régulière de l'amplitude du signal lors de la sommation, alors que l'amplitude des bruits lorsqu'elle augmente, augmente de façon aléatoire.
- d'autre part, par la connaissance de la plage des temps (d'un enregistrement à l'autre) au sein de laquelle apparaîtront les signaux recherchés.

L'estimation de l'erreur faite sur les temps lorsque la reconnaissance des signaux est problématique peut être alors très grande. Elle est égale à la fourchette dans laquelle on situe normalement les temps pour que les valeurs des vitesses ne soient pas illogiques, par rapport au terrain concerné. Ceci peut conduire, pour les temps longitudinaux, à des erreurs relatives de l'ordre de 20 % et pour les temps transversaux, de 50 à 100 %. Finalement, l'erreur est celle que l'on fait lorsqu'on estime les paramètres dynamiques simplement à partir de la connaissance géologique qu'on a du site.

(b) Erreurs dues à la précision des mesures

On peut admettre que le poids spécifique in situ est apprécié ou donné à 5 % près, c'est-à-dire que la valeur réelle peut être encadrée à 0,01 de part et d'autre.

Les distances sont calculées à partir des distances en surface et des résultats de l'inclinométrie. Il semble que l'erreur absolue ne doive pas dépasser 0,30 mètres.

Les temps longitudinaux et transversaux sont affectés de deux erreurs :

- une erreur de pointage des temps : c'est une erreur due à la lecture des temps sur le film.
- une erreur sur le moment réel de déclenchement du signal au point d'émission.

Avec les enregistreurs modernes, à mémoires, sommation des signaux et déroulement rapide, on peut estimer les erreurs maximales t sur le pointage du temps d'arrivée de :

- 0,100 ms pour les temps très courts (cross hole)
- 0,500 ms pour les temps longs (down hole)

L'erreur maximum sur le moment de déclenchement ne semble pas devoir dépasser 0,200 ms.

- Avec les enregistreurs sismiques classiques, ces erreurs sont portées à :
- 0,200 ms pour les temps très courts (cross hole)

- 1 ms pour les temps longs (down hole)
L'erreur maximale sur le moment de déclenchement ne semble pas devoir, là non plus, dépasser 0,200 ms.

(c) Calculs d'erreur

Pour le coefficient de Poisson :

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \right)$$

L'erreur ne dépend que des erreurs sur les temps. L'erreur absolue maximale s'exprime par :

$$\Delta \nu = \pm (1-2\nu) \frac{t_T}{t_L} \frac{\Delta t}{t_T - t_L} \frac{\Delta t_0}{t_T + t_L}$$

Pour des expérimentations soignées (enregistreurs à mémoire), l'erreur absolue maximum $\Delta \nu$ varie de moins de 0,01 à 0,06 lorsque ν passe de 0,45 à 0,30 et pour des essais cross hole (distance entre forages = 10 m).

Pour le module de cisaillement G :

$$G = \rho V_T^2$$

$$\frac{\Delta G}{G} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + 2 \left(\frac{\Delta x}{x} \right) + 2 \frac{\Delta t_T}{t_T}$$

Dans les mêmes conditions, on arrive à $\frac{\Delta G}{G} = 12\%$ à 23% lorsque G passe de 1000 à 15 000 mégapascals.

Pour le module dynamique E :

$$E = 2\rho V_T^2 (1+\nu)$$

Les erreurs sur $1+\nu$ et sur $\frac{\Delta t_T}{t_T}$ sont liées.

Le calcul montre que l'erreur maximale sur $\frac{1+\nu}{V_T^2}$ n'est pas égale à $\frac{\Delta \nu}{1+\nu} - 2 \frac{\Delta t_T}{t_T}$ mais à $\frac{1-2\nu}{1+\nu} \frac{t_T}{(t_T+t_L)} (\Delta t_0 + \Delta t) + 2 \frac{\Delta t_0 + \Delta t}{t_T}$ avec Δt et Δt_0 toujours de même signe.

$$\frac{|\Delta E|}{E} = \frac{|\Delta \rho|}{\rho} + \frac{|2\Delta x|}{x} + \left| \frac{1-2\nu}{1+\nu} \frac{t_T}{t_L(t_T+t_L)} (\Delta t_0 + \Delta t) + \frac{2(\Delta t_0 + \Delta t)}{t_T} \right|$$

Dans des conditions d'expérimentation satisfaisantes (enregistreur à sommation) l'erreur maximale possible sur E varie de 12 à 24 %, lorsque E passe de 2 500 à 40 000 mégapascals dans le cas du cross hole.

En introduisant de plus les résultats des calculs dans le cas du down hole avec une distance émission-réception de 50 m, on peut dresser le tableau récapitulatif suivant.

Il s'agit là d'erreurs maximales ; si l'on raisonne en erreurs probables, les valeurs sont beaucoup plus faibles, en général inférieures à 10 %.

ERREURS MAXIMALES

Distances Emission-Réception	CROSS HOLE	DOWN HOLE
	10 m	50 m
$\sigma = 0,45$ avec $\left\{ \begin{array}{l} V_L = 2\,000 \text{ m/s} \\ V_T = 600 \text{ m/s} \end{array} \right.$ $G = 1000 \text{ Mpa}$ $E = 2500 \text{ Mpa}$	$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = 2\%$	$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = 1\%$
	$\frac{\Delta G}{G} = 12\%$	$\frac{\Delta G}{G} = 8\%$
	$\frac{\Delta E}{E} = 12\%$	$\frac{\Delta E}{E} = 8\%$
$\sigma = 0,33$ avec $\left\{ \begin{array}{l} V_L = 5\,000 \text{ m/s} \\ V_T = 2\,500 \text{ m/s} \end{array} \right.$ $G = 15\,000 \text{ Mpa}$ $E = 40\,000 \text{ Mpa}$	$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = 20\%$	$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = 16\%$
	$\frac{\Delta G}{G} = 23\%$	$\frac{\Delta G}{G} = 16\%$
	$\frac{\Delta E}{E} = 24\%$	$\frac{\Delta E}{E} = 18\%$

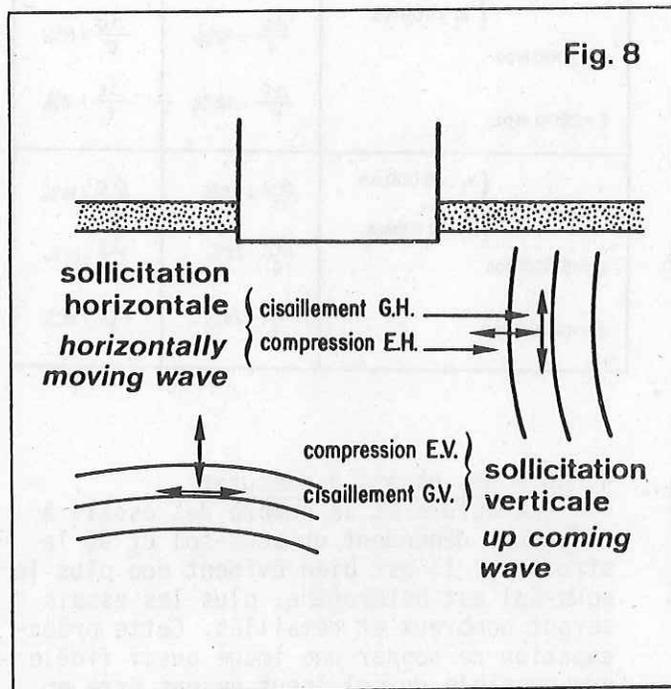
4. Choix des essais à exécuter

La nature et le nombre des essais à effectuer dépendent du sous-sol et de la structure. Il est bien évident que plus le sous-sol est hétérogène, plus les essais seront nombreux et détaillés. Cette préoccupation de donner une image aussi fidèle que possible du sol, peut ne pas être en accord avec la simplification exigée par les calculs "sol-structure". Nous pensons que la fourniture des données ne doit pas être faite uniquement en fonction de son utilisation sur le moment. Les méthodes de calcul évoluent en effet très vite, et il faut prévoir que les données pourront être reprises, sans que de nouveaux essais soient à faire.

Il faut chercher à mettre au point les méthodes les plus fiables fournissant les paramètres les plus utiles au projeteur et non pas seulement les plus faciles à obtenir.

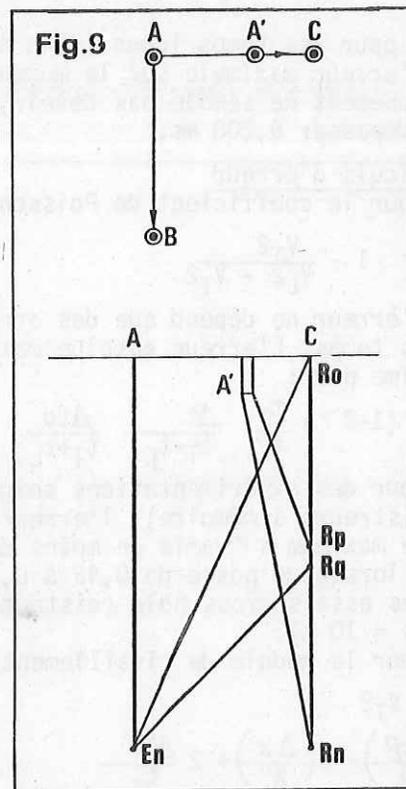
Il est en effet plus facile d'obtenir des ondes de cisaillement correspondant à des trajets horizontaux ("cross hole") qu'à des trajets verticaux "down hole" et "up hole". L'expérience montre que l'anisotropie est généralement importante (10 à 30 % sur la vitesse transversale, soit 20 à 70 % sur le module de cisaillement G). D'autre part, le seul cross hole donne parfois mal les vitesses longitudinales, nécessaires au calcul du coefficient de Poisson. Or, pour l'exploitation du programme FLUSH, par exemple, le projeteur doit

considérer une sollicitation verticale venant du tréfonds, davantage qu'une sollicitation se propageant horizontalement.



Le "cross hole" ne simule que la sollicitation horizontale, le "up hole" simule la sollicitation verticale. Cette deuxième mesure, plus importante, est mesurée par certains Américains, mais pas par tous, car plus délicate à obtenir correctement.

Il en résulte qu'il nous semble nécessaire de considérer comme un ensemble indivisible d'opérations unitaires, l'ensemble suivant :



- 1) Un "cross hole" A → C
 Un "cross hole" A → B
 On obtient ainsi les paramètres dynamiques suivant deux directions horizontales perpendiculaires.
 - Dans les couches superficielles, les mesures peuvent être faites à la maille du mètre (2 mètres de différence d'altitude entre deux essais). Dans ce cas et pour être sûr d'un trajet direct, évitant les réfractations parasites, on fait les mesures entre 2 forages rapprochés : A' → C tel que A'C = 3 à 5 m
 - Dans les couches plus profondes, la maille de mesure est en général de 5 m.
- 2) Un "down hole" et un "up hole"
 On obtient ainsi les paramètres dynamiques suivant la direction sub-verticale
 - "down hole"
 Emission en A' et réception en C entre Rp et Rn par exemple.
 - "up hole"
 Emission en En et réception entre Ro et Rq
 Comme dans le "cross hole", la maille de mesure pourra être de 2 m dans les horizons supérieurs et de 5 m dans les horizons plus profonds.

On aboutit ainsi à 3 tableaux de résultats donnant V_L , V_T , E, G et ν dans 3 directions perpendiculaires.

- Ces tableaux peuvent subir un début de traitement qui comprend principalement des regroupements de résultats par tranches de terrain. Ces regroupements doivent tenir compte des erreurs expérimentales et de la dispersion géologique normale qui ne manque pas de se produire au sein d'une couche qu'on qualifie de géologiquement homogène.
- Au-delà de ces regroupements, il ne semble pas souhaitable à ce niveau de l'étude, de chercher à rendre le sous-sol plus homogène qu'il n'est en moyennant tous les résultats d'un site.
- Une discussion et une interprétation de l'anisotropie peut être tentée, dans le but de savoir quels sont les coefficients d'anisotropie réellement significatifs de la structure du sol.

Il est également possible d'étudier des zones plus étendues par la méthode du "panneau sismique", ou grand cross hole, qui utilise plusieurs émetteurs dans un forage, et plusieurs récepteurs dans un autre forage.

Un calcul itératif, prenant en compte la courbure des rayons sismiques, permet de dresser des cartes complètes des vitesses longitudinales (et même transversales dans certains cas) entre 2 forages.

(J. LAKSHMANAN et al, 1982, A. MARTINET et al, 1982).

REFERENCES

- (1) G. DELEUZE : "Réponse à un mouvement sismique d'un édifice posé sur un sol élastique". ANNALES ITBTP, 20ème année, juin 1967.
- (2) M.L. SILVER et al : "Dynamic Geotechnical Testing". ASTM, Special Publication 654, 1978.
- (3) F. HENNING, J.JACQUEMART, J.LAKSHMANAN, J. ROUGE : "Campagne géosismique sur le site nucléaire de DOEL pour la détermination des paramètres dynamiques du sol - Influence de la présence des constructions". Colloque National du Comité Belge de Géologie de l'Ingénieur, Gand, octobre 1981.
- (4) J. LAKSHMANAN et un groupe de Travail du Comité Français des Grands Barrages: "Techniques nouvelles de reconnaissance". XIVème Congrès International des Grands Barrages, Rio de Janeiro, mai 1982.
- (5) A. MARTINET, G.AKERMANN, J.LAKSHMANAN, F. LANTIER : "Etude géologique, géophysique et géotechnique de l'usine de Vernay". Symposium International de l'ISRM, Aachen, mai 1982.