

FLS

GAND, OCTOBRE 1981

CAMPAGNE GEOSISMIQUE SUR LE SITE NUCLEAIRE DE DOEL
POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES DYNAMIQUES DU SOL
INFLUENCE DE LA PRESENCE DES CONSTRUCTIONS

F. HENNING (1), J. JACQUEMART (1)

J. LAKSHMANAN (2), et J. ROUGE(3)

Résumé :

Afin d'étudier le comportement de l'ensemble sol-structure de la centrale nucléaire de Doel vis à vis des seismes, il a été procédé à une gamme complète de mesures géosismiques telles que "down hole" et "cross hole" destinée à fournir les modules d'élasticité du sol. Un ensemble d'équipements modernes a été mis en oeuvre: enregistreur à mémoire à 24 voies et système de frappe autonome en forage. En particulier, des mesures par transparence (panneau sismique) ont fourni une carte des vitesses sous la centrale en cours d'édification. Il a été mis en évidence une augmentation des modules de l'ordre de 20 % et ce, jusqu'à 15 mètres sous la base des pieux.

GEOSISMICHE METINGEN OP DE WERF TE DOEL VOOR HET BEPALEN VAN
DYNAMISCHE PARAMETERS VAN DE BODEM ; INVLOED VEN DE AANWEZIGHEID VAN DE GEBOUWEN

Samenvatting :

Ten einde de houding van het bodem-striktuur geheel van de centrale te Doel tegenover aardbevingen te bestuderen, werden ter plaatse verschillende sismische metingen gedaan om de elasticiteitsmodules van de bodem te verkrijgen. Deze metingen omvatten een hele reeks technieken zoals down-hole en cross-hole. Een reeks moderne uitrustingen werd gebruikt : een 24-kanalen opnemer met geheugen, en autonoom klopsysteem bij de boring. Meer bijzonder is men tot de ontleding overgegaan van door transparentie uitgevoerde metingen onder de in aanbouw zijnde centrale, tussen twee boringen, en dit door een iteratieve werkwijze, sismiche panelen genoemd. Men verkrijgt een kaart van de snelheden onder de centrale. Eens de korrektie aangebracht van regelmatige zijdelingse variaties is een stijging van ongeveer 20% van de modules in het licht gesteld, en dit tot 15 meter onder de basis van de palen.

(1) Ingénieurs, TRACTIONEL, 31, rue de la Science, 1040 BRUXELLES

(2) Ingénieur, Directeur Général, C.P.G.F., 77, av. Victor-Hugo - 92500 - RUEIL-MALMAISON (France)

(3) Ingénieur, GEOBEL, 96, avenue des Saisons, 1050 BRUXELLES

1. INTRODUCTION

A la demande d'E.B.E.S. et de TRACTIONEL, Ingénieurs Conseils, GEOBEL a été chargée de déterminer les modules dynamiques sur le site nucléaire de DOEL III, en cours d'édification. La campagne a été réalisée avec l'appui technique de la Compagnie de Prospection Géophysique Française.

Une gamme de techniques nouvelles a été mise en oeuvre et notamment (J. LAKSHMANAN et al, à paraître, 1982) :

- enregistreur digital à mémoire NIMBUS (24 voies)
- système de frappe autonome
- panneau sismique

Cet ensemble se compare très favorablement avec les techniques en usage aux Etats-Unis (M.L. SILVER, D. TIEDEMANN, 1977). Il se justifie par la complexité des conditions de travail et par l'importance de l'objectif.

La connaissance des paramètres dynamiques du sol est nécessaire pour le calcul de la réaction de l'ensemble sol-structure vis à vis d'un séisme éventuel.

2. CONTENU DE L'ETUDE - CADRE GEOLOGIQUE

2.1. Objectifs de la campagne

L'objectif était la détermination des paramètres G (module de cisaillement), (module d'élasticité) et ν (coefficient de Poisson) à partir des vitesses de propagation des ondes de compression (ou vitesses longitudinales-VL) et des vitesses des ondes de cisaillement (ou vitesses transversales-VT).

Ces paramètres sont liés par les formules suivantes :

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{VT^2}{VL^2 - VT^2} \right)$$

$$G = \delta VT^2$$

$$E = 2(1 + \nu) G$$

δ étant la masse spécifique

Si VL et VT sont exprimées en m/s, δ en g/cm³ et G en megapascals, on a :

$$G = 10^{-3} \cdot \delta \cdot VT^2.$$

La mesure des vitesses VT et VL, à partir d'ébranlements mécaniques de faible amplitude, permet ainsi de calculer G, ν et E pour des déformations relatives de l'ordre de 10⁻⁶. Les essais de cisaillement dynamiques Zeevaert, réalisés par ailleurs en laboratoire, permettent d'étendre les résultats vers les grandes déformations.

Compte-tenu de la stratification horizontale des terrains en présence créant une anisotropie, il convenait de déterminer pour chaque couche, les paramètres ci-dessus pour des sollicitations horizontales et pour des sollicitations verticales.

De plus, compte-tenu de la mise en compression des couches sous le poids de l'ouvrage, il convenait de déterminer ces paramètres, aussi bien en terrain "vierge" ("free field") qu'en zone comprimée, et ce, pour chaque couche de terrain.

2.2. Cadre géologique

Le site avait été déjà reconnu par de nombreux sondages carottés et essais de pénétration. La coupe géologique moyenne est la suivante, de haut en bas :

	<u>ALTITUDES</u>	<u>GEOLOGIE</u>	<u>DENSITES</u> (g/cm ³)
1)	de + 9 à + 4	Remblai de sable fin	1,3 à 1,5
2)	de + 4 à + 1	Argile limoneuse ou tourbeuse	1,6
3)	de + 1 à - 1	Sable fin limoneux à argileux	1,8
4)	de - 1 à - 4	Tourbe et/ou alternance argilo-sablo-tourbeuse	1,06 ou 1,30
5)	de - 4 à - 42	Sable coquiller, présentant des niveaux plus compacts	1,90
6)	de -42 à - 140	Argile de Boom	1,95

2.3. Programme de mesures

L'entreprise SIF BACHY a réalisé les sondages suivants :

5 sondages destructifs A à E, d'une profondeur de 71 à 92 m

3 sondages destructifs auxiliaires (A' à E'), d'une profondeur de 10 m

1 sondage carotté F (vibro percussion), d'une profondeur de 16 m

Un tubage plastique PVC 80 x 73 a été mis en place et solidarisé du terrain par injection d'un coulis approprié.

Les sondages ont fait l'objet de mesures d'inclinométrie, puis des mesures géosismiques suivantes :

- "down hole" (mesures verticales) en utilisant pour l'émission les sondages annexes
- "cross hole" classique (mesures horizontales) : A-B, B-C, E'-E (et E'-F pour les couches de surface).

En outre, un grand "cross hole" ou panneau sismique, avec traitement mathématique élaboré, a été réalisé entre D et A pour l'étude des sols sous la centrale.

3. PRINCIPES GENERAUX DES METHODES UTILISEES

3.1. Méthode "down hole "

Elle consiste à mesurer les caractéristiques VL, VT, puis à calculer ν , G et E dans la direction verticale ou subverticale (voir figure 1). Pour cela, on doit émettre un choc ou une explosion dans un forage ou en surface non loin du

forage de réception, de façon à ce que le trajet des ondes soit le plus proche possible de la verticale. Dans le forage de réception se trouvent des capteurs tridirectionnels plaqués pneumatiquement contre la paroi du forage.

D'autre part, pour faciliter l'obtention des ondes longitudinales, on a utilisé séparément comme récepteur une grappe de 12 hydrophones, espacés de 2,50 mètres. Dans certains cas, un point d'émission a été placé en profondeur (mesure "up hole").

3.2. Méthode du "cross hole"

L'émission se fait par frappe sur le haut du train de tige du forage. La transmission au terrain est assurée par l'outil. Un capteur est placé dans le forage de réception à la même altitude que celle de la frappe. Après enregistrement, le forage est repris pour amener le fond du trou à la profondeur désirée, profondeur à laquelle on descend le capteur dans le forage de réception. On utilise les mêmes capteurs que pour le "down hole". Afin d'éviter les problèmes de réfraction et des courbures de trajets, la distance émission - réception est limitée à 10 - 20 mètres.

3.3. Emission autonome

Dans le cas présent, on a utilisé, en parallèle, un nouveau système de frappe, indépendant de la colonne de forage. On provoque la chute libre d'une masse cylindrique coulissant sur une tige guide. Cette tige est solidaire d'un tube plaqué pneumatiquement à la paroi du forage. Le système comprend un capteur déclenchant l'enregistrement. Ce système permet de créer préférentiellement des ondes de cisaillement. D'autre part, une polarisation de ces ondes est possible. En frappant alternativement vers le haut, puis vers le bas, on provoque des ondes de cisaillement de polarité inversée, et des ondes de compression de même polarité.

3.4. Méthode des panneaux sismiques

Cette méthode consiste à mesurer les vitesses sismiques entre un forage d'émission et un forage de réception, situés à 50-200 m de distance. Le but étant d'étudier la répartition des vitesses des ondes longitudinales entre deux forages, on s'attache principalement à fournir des documents (films sismiques) où les temps d'arrivée des ondes longitudinales ne sont affectés que d'une erreur très faible. Cette méthode a été appliquée au Génie Civil pour une usine souterraine au Zaïre (Ph. LECHAT, Y. LEMOINE, A. MONJOIE 1972 et M. LA PORTE et al 1973) puis a connu un important développement récent pour les centrales nucléaires.

Pratiquement, dans le cas présent, on a procédé comme suit :

- mise en place de 12 capteurs hydrophones tous les 5 mètres, le premier capteur placé à 15 m au-dessous du niveau du sol.
- exécution de 12 tirs au cordeau détonant, tous les cinq mètres dans le forage d'émission.

Le procédé de calcul itératif tient compte de la courbure des rayons (P. BOIS et al 1971). Il consiste à minimiser les écarts entre les temps calculés et les temps mesurés, en ajustant, à chaque itération, les vitesses d'une matrice de "pavés" élémentaires.

Le matériel d'enregistrement digital NIMBUS à 24 canaux permet la mesure de temps à 0,05 ms près, la mémorisation et la sommation des signaux.

3.5. Exemples d'enregistrements

La figure 2 représente un enregistrement cross hole, correspondant à la sommation de 10 coups de marteau successifs. Sur la moitié inférieure de l'enregistrement, la vitesse d'enregistrement des mémoires est 2,5 fois plus faible. Les mêmes géophones sont enregistrés en parallèle. L'objectif de cet enregistrement double est de bien montrer le caractère énergétique de l'onde secondaire (transversale) et dont la fréquence dominante est plus faible (140 Hz au lieu de 600 Hz environ).

La figure 3 montre une mesure "cross hole" faite avec le système de frappe autonome. Les traces 1 à 12 sont enregistrées à grande vitesse (1 cm = 0,5 milliseconde). On note une arrivée longitudinale assez faible pour la frappe vers le bas, trace 2 à 1,05 ms, invisible pour la frappe vers le haut (cisaillement pur). Entre 3 et 8 ms, les 2 traces n° 2 et 3 sont en phase, puis arrive l'onde de cisaillement vers le haut pour la frappe vers le haut et vers le bas pour la frappe vers le bas.

La figure 4 représente l'ensemble des enregistrements correspondant à un cross hole avec un géophone horizontal.

La figure 5 représente un ensemble d'enregistrements "down hole".

3.6. Estimation des erreurs

Les erreurs relatives maximales sont les suivantes :

- 5 % sur les densités
- 1,5 à 2 % sur les longueurs
- 0,6 à 2 % sur les temps transversaux
- 2 à 7 % sur les temps longitudinaux

Pour quelques points de mesure superficiels, les enregistrements ont été perturbés par des parasites du chantier, les erreurs pouvaient atteindre 9 à 13 %.

Les erreurs maximales sont ainsi dans l'ensemble :

en profondeur : 4 % pour VL et 10 % pour VT

en surface : 7 % pour VL et 17 % pour VT

En comparant ces valeurs avec les écarts types calculés sur l'ensemble des valeurs, on peut tenter d'apprécier la "dispersion géologique", dont l'ordre de grandeur est proche de la différence entre ces deux séries de chiffres.

Cette dispersion naturelle serait de l'ordre de :

	<u>VL</u>	<u>VT</u>
couches de surface	15 %	13 %
sable (entre -12,50 et - 40)	4 %	9 %
argile	3 %	5 %

3.7. Ondes de tube

Une partie des mesures "down hole" ont été faites avec une grappe de 12 hydrophones, avec comme objectif, l'enregistrement valable des ondes longitudinales.

Nous avons en outre observé une onde secondaire très caractéristique, d'autant plus facile à suivre que l'on enregistre 12 hydrophones simultanément. En suivant J.E.WHITE (1965), on peut attribuer cette arrivée à une onde de tube ("tube wave"). Lorsque la fréquence observée est assez élevée (ce qui est le cas ici : 120 à 300 Hz), la vitesse de propagation des ondes de trou est "proche" (sans que WHITE donne une valeur précise) de celles des ondes de RAYLEIGH VR (qui elles, se propagent à l'interface sol-air dans le cas d'un ébranlement en surface).

Pour des coefficients de Poisson de 0,45 à 0,48, le rapport $\frac{VT}{VR}$ est de l'ordre de 1,05. Nous avons adopté cette valeur et assimilé la vitesse des ondes de tube à celles des ondes de RAYLEIGH. Nous avons constaté que l'onde de tube se propage probablement à une vitesse environ 5 ou 10 % inférieure à celle de l'onde de RAYLEIGH, donc de 10 à 15 % inférieure à celle de l'onde de cisaillement.

Des vitesses d'onde de tube très semblables ont été enregistrées sur un ouvrage voisin fondé sur l'argile de Boom (J.P. HENRIET, communication verbale).

4. RESULTATS

4.1. Vitesses et modules

L'ensemble des vitesses longitudinales et transversales en dessous de la cote - 10 sont représentées figure 6 et 7. Les caractéristiques moyennes de chaque couche sont résumées dans le tableau suivant.

	Vitesses moyennes		Module G (MPa)			Module E (MPa)			Coefficient de Poisson			GH/GV
	VL m/s	VT m/s	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max	
1) Remblai hydraulique	405	182	30	46	90	90	127	250	0,20	0,37	0,45	0,5
2) Argile supérieure	1010	195	40	61	120	130	180	350	0,46	0,48	0,49	0,5
3) Sable supérieur	1375	165	20	49	90	50	149	260	0,49	0,49	0,49	2
4) Ensemble tourbeux	870	221	10	64	100	30	186	280	0,45	0,47	0,48	0,6
5) Tête du sable	1575	325	120	201	270	350	593	780	0,46	0,48	0,48	1,18
6) Sable (-11 à -41)	1780	406	200	313	500	610	922	1440	0,45	0,47	0,48	2
7) Argile de Boom	1685	329	160	211	250	480	625	750	0,47	0,48	0,48	0,84

On peut signaler les points singuliers suivants :

- dans le remblai et l'argile supérieure, les modules augmentent avec la profondeur,
- l'ensemble tourbeux peut avoir des modules très faibles lorsqu'il s'agit de tourbe pure (GV ~ 10 MPa, GH ~ 24 MPa)
- dans la tête du sable (couche 5), l'effet de compression due à la centrale serait de 20 % sur G
- dans la masse du sable, la stratification fait alterner des bancs plus ou moins consolidés ; de plus les modules varient d'une extrémité à l'autre de la centrale (pour des causes probablement sédimentaires)
- l'argile présente des vitesses transversales très homogènes ("dispersion géologique" de l'ordre de 5 % au lieu de 9 % pour le sable).

4.2. Anisotropie

Si on suppose que l'anisotropie est elliptique,

$$V(\varphi)^2 = V_H^2 \cos^2 \varphi + V_V^2 \sin^2 \varphi$$

φ étant l'angle du rayon considéré avec l'horizontale, on peut, par régression entre V^2 et $\sin^2 \varphi$, et pour différentes couches de terrain, calculer les valeurs de la vitesse horizontale (VH) et de la vitesse verticale (VV) ainsi que de

$$\text{l'anisotropie } A = \frac{V_H}{V_V}$$

Un premier calcul a pris en compte les valeurs de VT obtenues en cross hole et en mesures inclinées ; lors d'un deuxième calcul, nous avons inclus les ondes de tube ($\times 1,05$), et ce pour l'ensemble du sable entre 22,5 et 50 m d'une part, et pour l'argile sous-jacente, d'autre part.

On constate dans le sable une anisotropie assez forte et conforme à celle habituellement constatée dans les milieux horizontalement stratifiés ($\frac{V_H}{V_V} = 1,117$). Lorsqu'on inclut les ondes de tube, l'anisotropie s'accroît ($\frac{V_H}{V_V} = 1,311$).

Pour l'argile, on note une anisotropie inverse. Lorsqu'on inclut les ondes de tube dans le calcul, cette anisotropie inverse est accentuée (0,858 au lieu de 0,972). On peut supposer que les vitesses transversales calculées à partir des ondes de tube multipliées par 1,05 sont correctes, mais que l'enveloppe du vecteur vitesse n'est pas une ellipse ; elle se rapprocherait davantage d'un rectangle ("couché" pour le sable et "debout" pour l'argile).

4.3. Corrélation entre VT et VL

A titre de contrôle de l'ensemble des résultats, et aussi pour mieux exploiter les résultats du panneau, nous avons établi une corrélation du paramètre $\frac{V_T}{V_L}$ (fonction du coefficient de Poisson ν) et la vitesse longitudinale VL.

Le graphique montre deux parties distinctes. Tout d'abord, pour les terrains de surface généralement non saturés, le rapport $\frac{V_T}{V_L}$ diminue de 0,50 à 0,12 lorsque VL augmente de 400 à 1400 m/s.

Ensuite $\frac{V_T}{V_L}$ augmente pour atteindre un maximum aux environs de 0,19 (argile) ou de 0,26 (sable) pour VL de l'ordre de 1700 m/s. Il semblerait qu'ensuite $\frac{V_T}{V_L}$ ait tendance à diminuer légèrement lorsque VL dépasse 1800 m/s.

4.4. Panneau sismique, effet de compression de la centrale

Le traitement du panneau sismique, pour lequel les mesures ont été limitées aux vitesses longitudinales, a permis d'établir une carte de vitesses (figure 8), montrant des vitesses élevées dans le sable entre les altitudes - 21 à - 36 (1 730 - 1 920 m/s), puis une alternance de niveaux lents (1 670 - 1 750 m/s) et un niveau plus rapide (1 700 - 1 880 m/s) dans l'argile, avec de plus, augmentation générale des vitesses de D vers A. La compression due à la centrale se manifeste par une augmentation des vitesses longitudinales de l'ordre de 3 à 6 % au-dessus de la cote - 38.

La figure 9 permet de comparer les valeurs de vitesse du milieu du panneau, couche par couche, avec celles déterminées sur les bords. A la cote -15, l'accroissement de la vitesse longitudinale due à la compression est de $\frac{1,036}{0,978} = 1,058$.

A la cote -20, de $\frac{1,023}{0,978} = 1,045$, soit 4,5 %

A la cote -25, de $\frac{1,011}{0,978} = 1,033$, soit 3,3 %

L'accroissement semble être nul en dessous de la cote - 38.

Compte-tenu des corrélations VT - VL, il est possible de transformer la figure 8 en carte des vitesses transversales et en carte des modules G (figure 10). Cette carte montre nettement le banc de sable plus rapide entre les cotes - 10 et - 42, divisé en deux par une zone intermédiaire plus lente. Les maxima sont constatés aux cotes - 12 et - 38, ce qui correspond à peu près au premier et au troisième bancs de sable très compact. L'effet de compression par la centrale s'étendrait jusqu'à la base du sable.

5. CONCLUSIONS GENERALES

La campagne de mesures réalisée par GEOBEL, afin de déterminer la répartition des modules dynamiques du sol de fondations de la Centrale Nucléaire de DOEL III a été réalisée à l'aide de divers procédés de mesure : "cross hole", "down hole", "up hole", et panneau sismique ou grand "cross hole".

L'analyse critique des résultats permet de fournir pour chaque couche et compte-tenu d'un nombre de sondages relativement limité : des modules G et E, le coefficient de Poisson, l'anisotropie, la précision des mesures et la dispersion géologique probable.

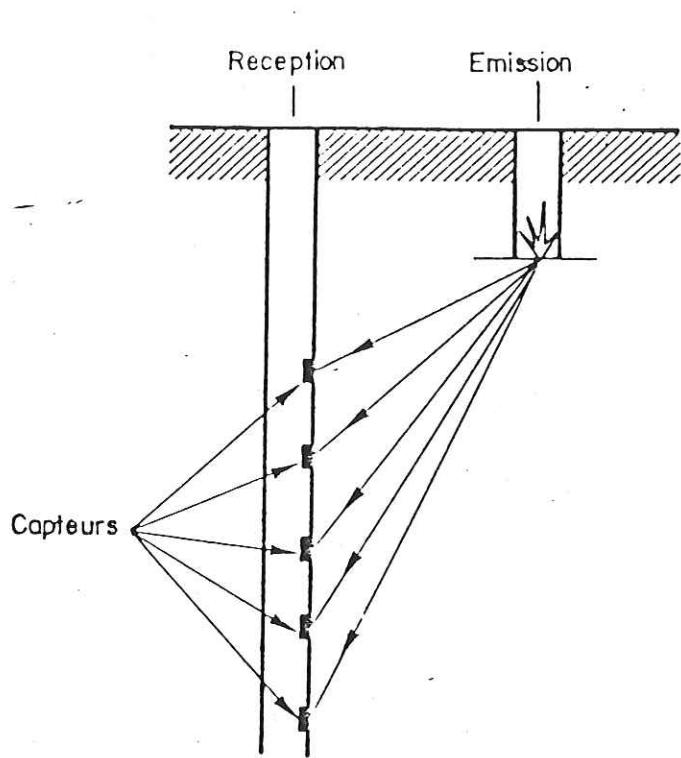
Divers schémas peuvent être proposés pour la modélisation du sol, afin d'effectuer les calculs permettant de prévoir la réaction de l'ensemble sol - structure, vis à vis des seismes :

- (a) un modèle isotrope moyen : avec 7 couches isotropes (voir figure 11) ; la couche de sable numéro 5 étant décomposée en deux couches.
- (b) un modèle anisotrope : avec pour chacune des 7 couches, des valeurs différentes de G, ν et E suivant la direction de la sollicitation.
- (c) des modèles extrêmes : permettant au projeteur de tenir compte de la possibilité de valeurs de G s'écartant localement de 30 % des valeurs précédentes pour les 5 couches de tête, ou de 20 % pour le sable (6) et l'argile (7).

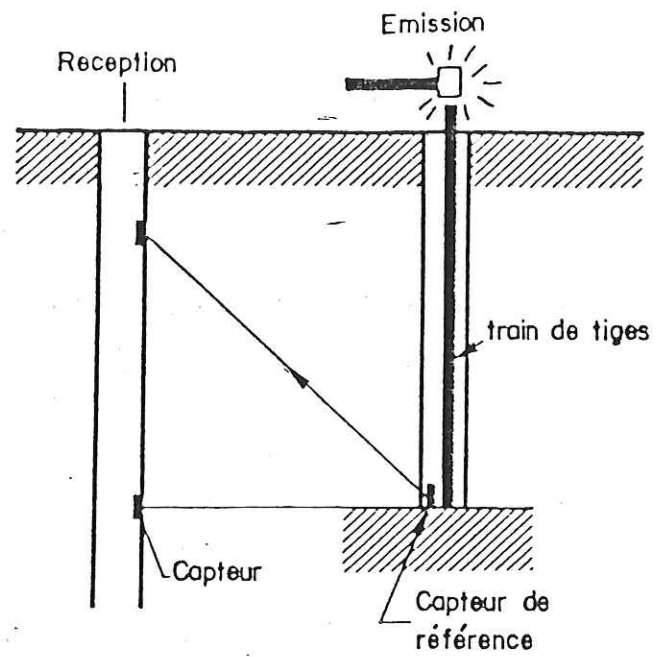
L'effet de compression de la centrale augmenterait le module G des couches sableuses (5) et (6) de 10 à 20 %.

REFERENCES

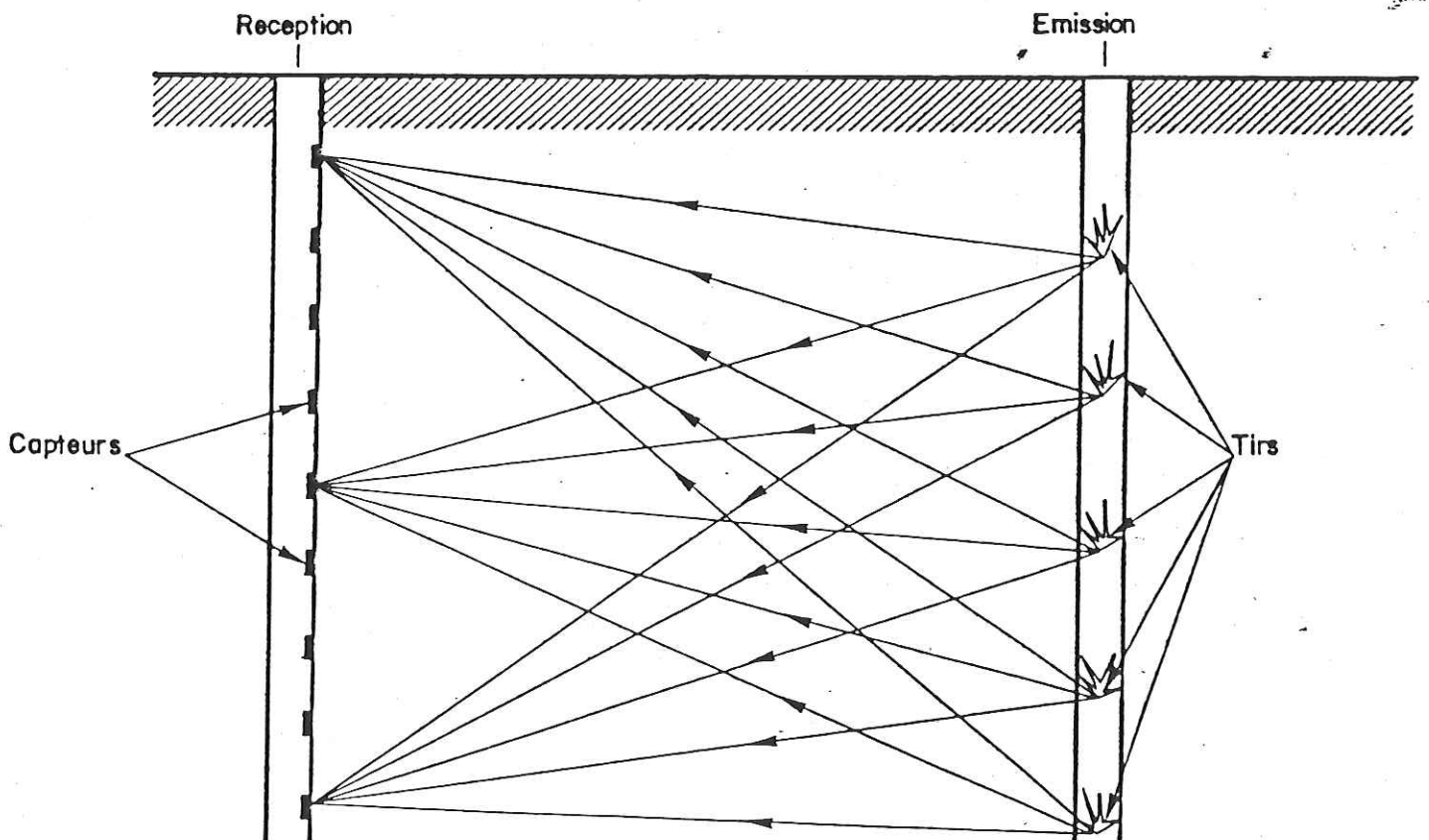
- J. LAKSHMANAN et al (à paraître, 1982) : Nouvelles techniques de reconnaissance, par un groupe de travail du Comité National Français, animé par J. LAKSHMANAN, Quatorzième Congrès des Grands Barrages, Rio de Janeiro, 1982.
- M.L. SILVER, D. TIEDEMANN (1977) : Dynamic Geotechnical Testing, ASTM, Philadelphia, 1977.
- Ph. LECHAT, Y. LEMOINE, A. MONJOIE (1971) : Apports des études sismiques et pressiométriques à l'étude la fracturation du rocher dans le cas d'un site de barrage, Symposium Soc. Int. Mec. Roches, Nancy 1971.
- M. LA PORTE, M. LAVERGNE, J. LAKSHMANAN, C. WILLM (1973) : Mesures sismiques par transmission, application au Génie Civil, Geophysical Prospecting, vol. XXI, n° 1 1973.
- P. BOIS, M. LA PORTE, M. LAVERGNE, G. THOMAS (1971) : Essai de détermination automatique des vitesses sismiques par mesures entre puits, Geophysical Prospecting, vol. 19, pages 42-83, 1971.
- J.E. WHITE (1965) : Seismic waves : radiation, transmission and attenuation, MC GRAW HILL, New-York, 1965.



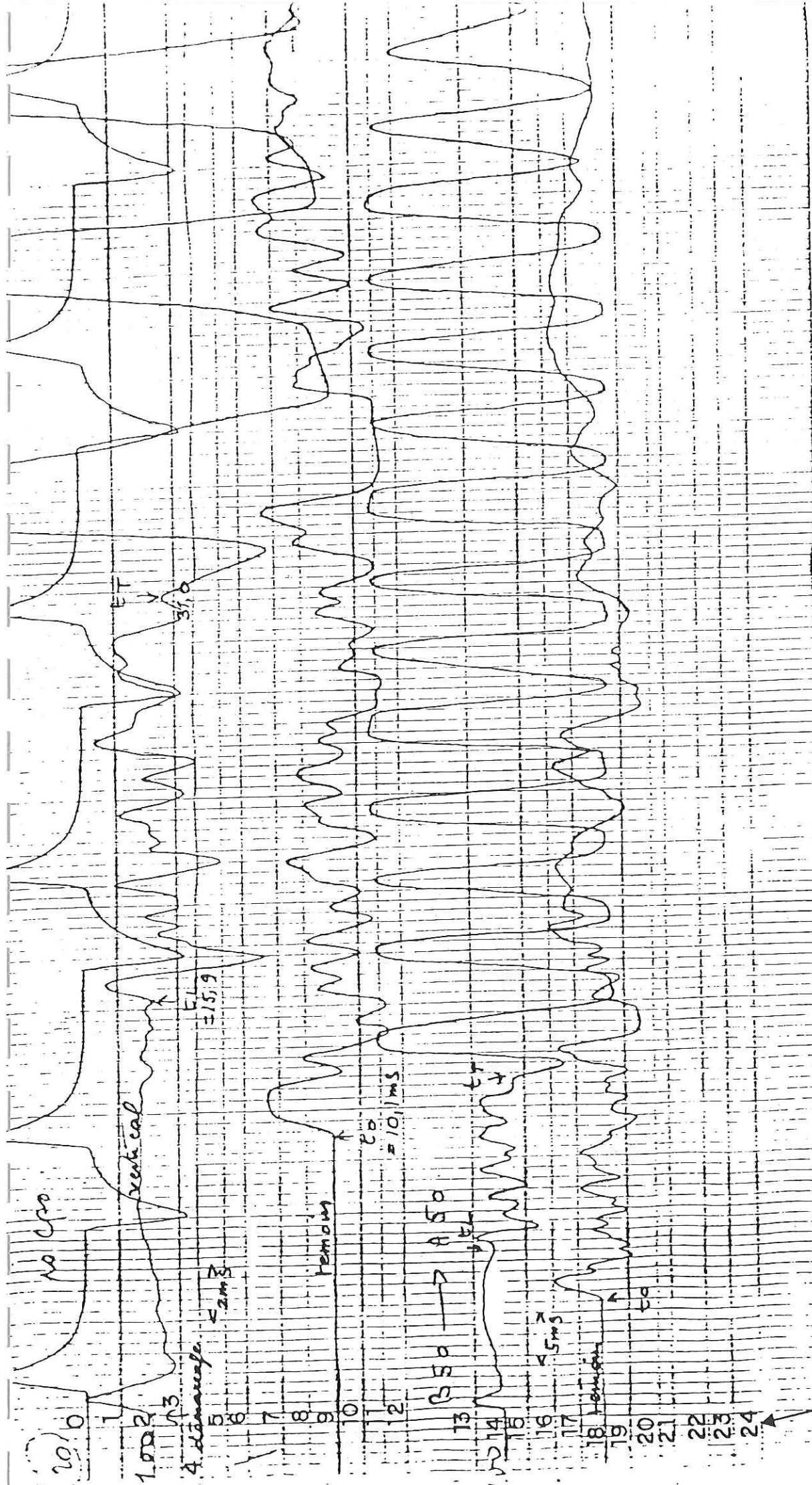
METHODE DU "DOWNHOLE"



METHODE DU "CROSSHOLE"

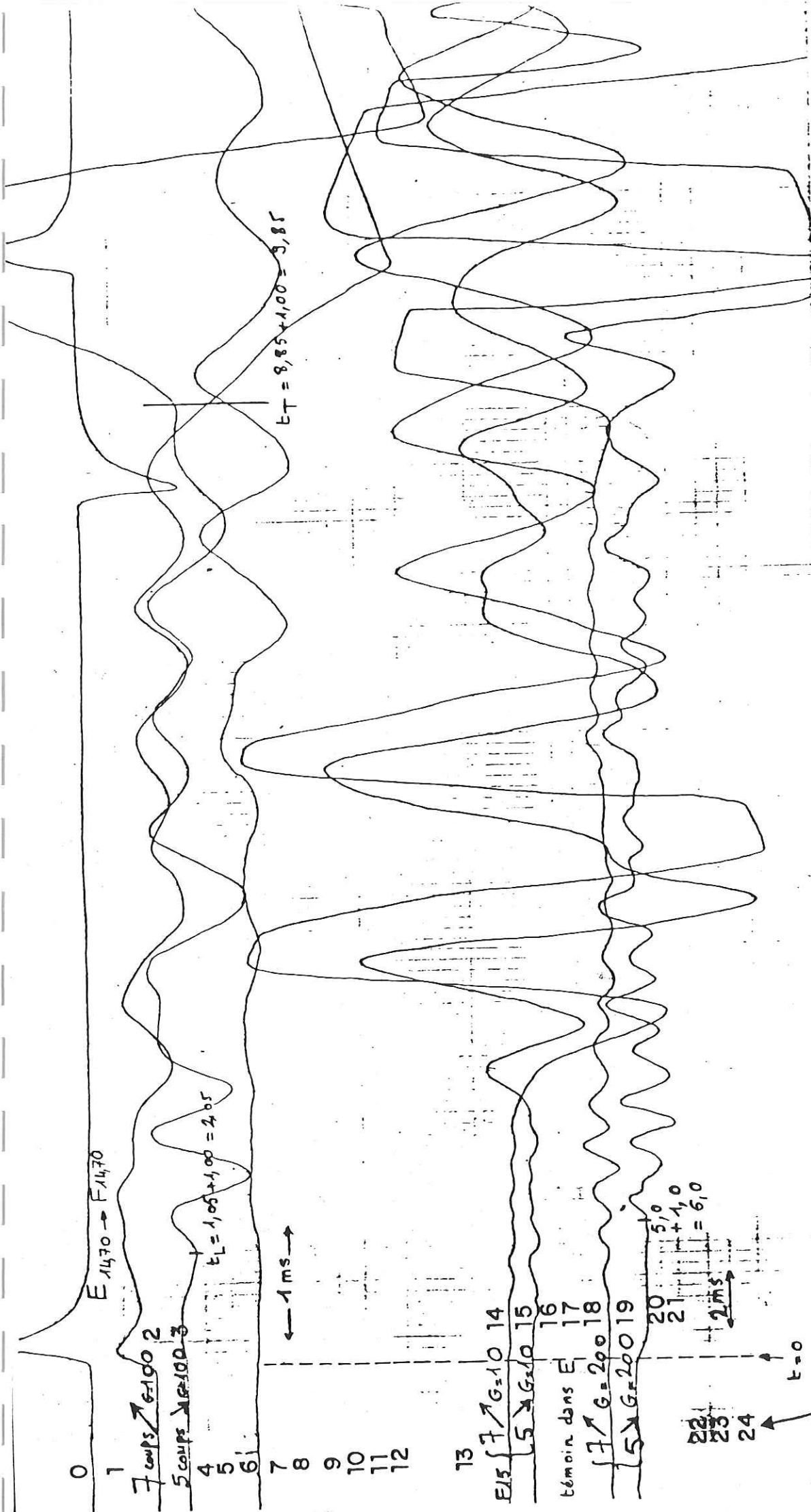


TIRS PAR TRANSPARENCE (PANNEAUX)



EXEMPLE DE FILM; CROSS HOLE B50 → A50

numeros des galvanometres



EXEMPLE DE FILM; FRAPPE AUTONÔME E'14,70

numéros des galvanomètres

SISMOGRAMME D'ENSEMBLE
CROSS HOLE C-B

CAPTEUR HORIZONTAL

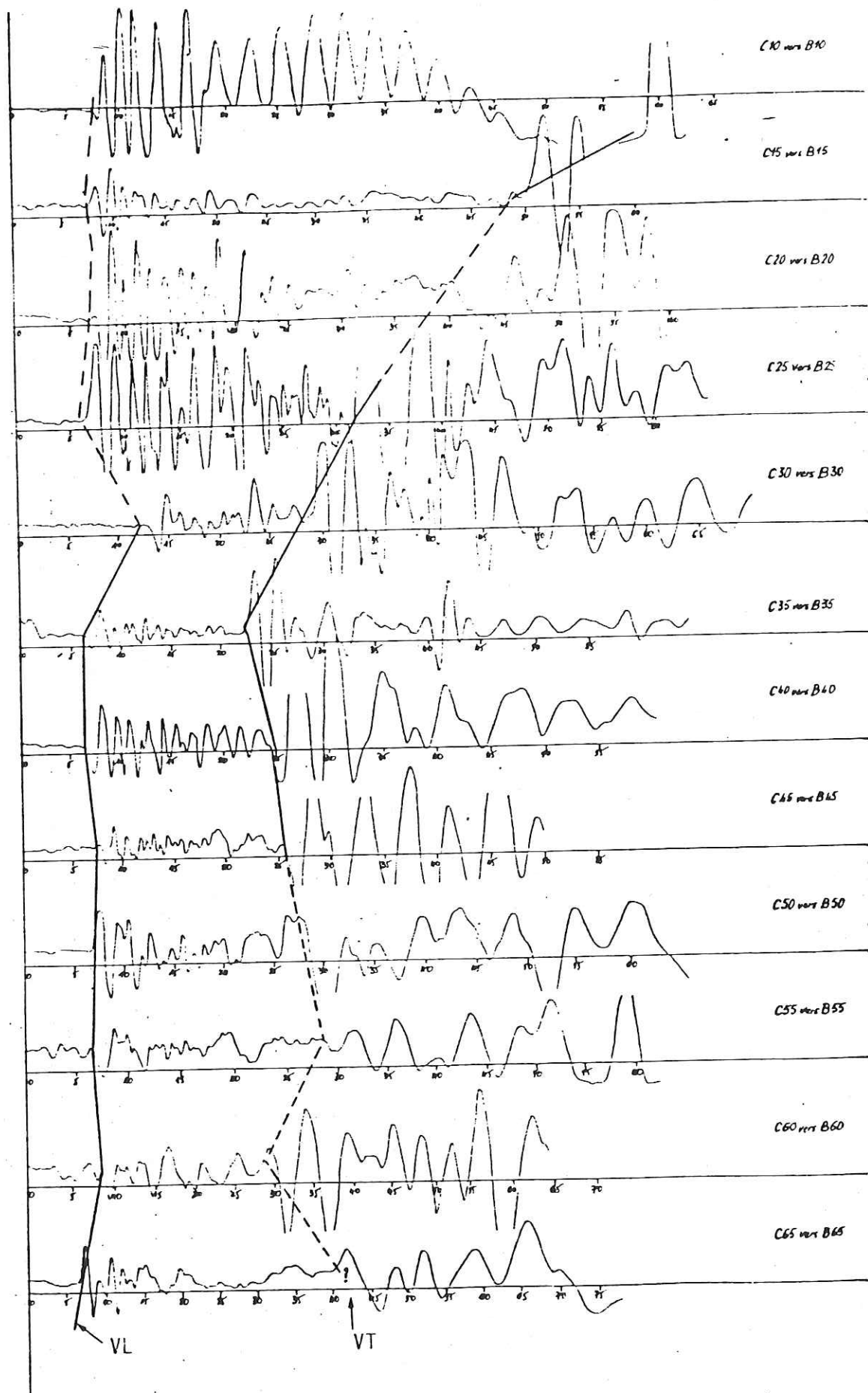
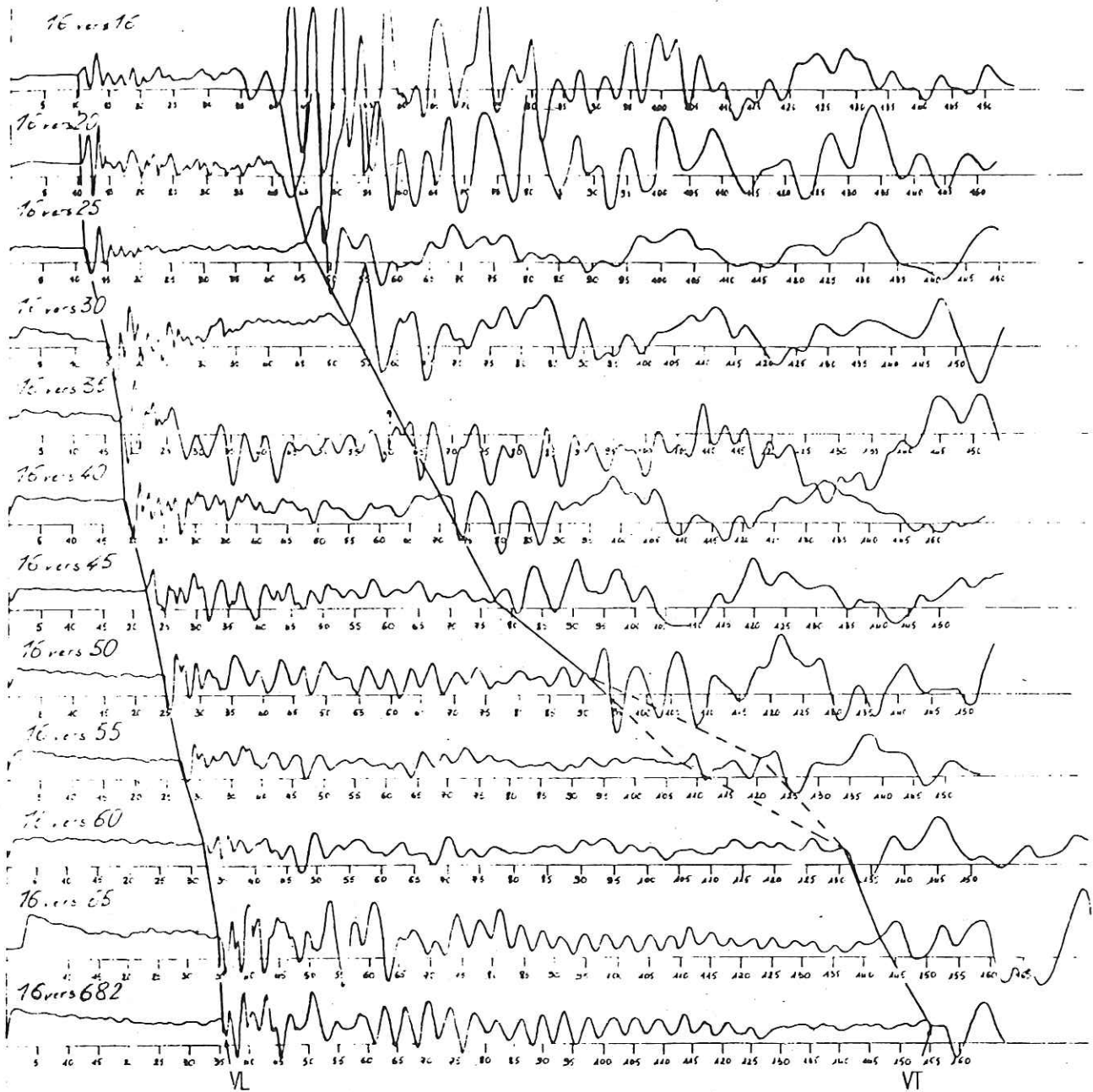
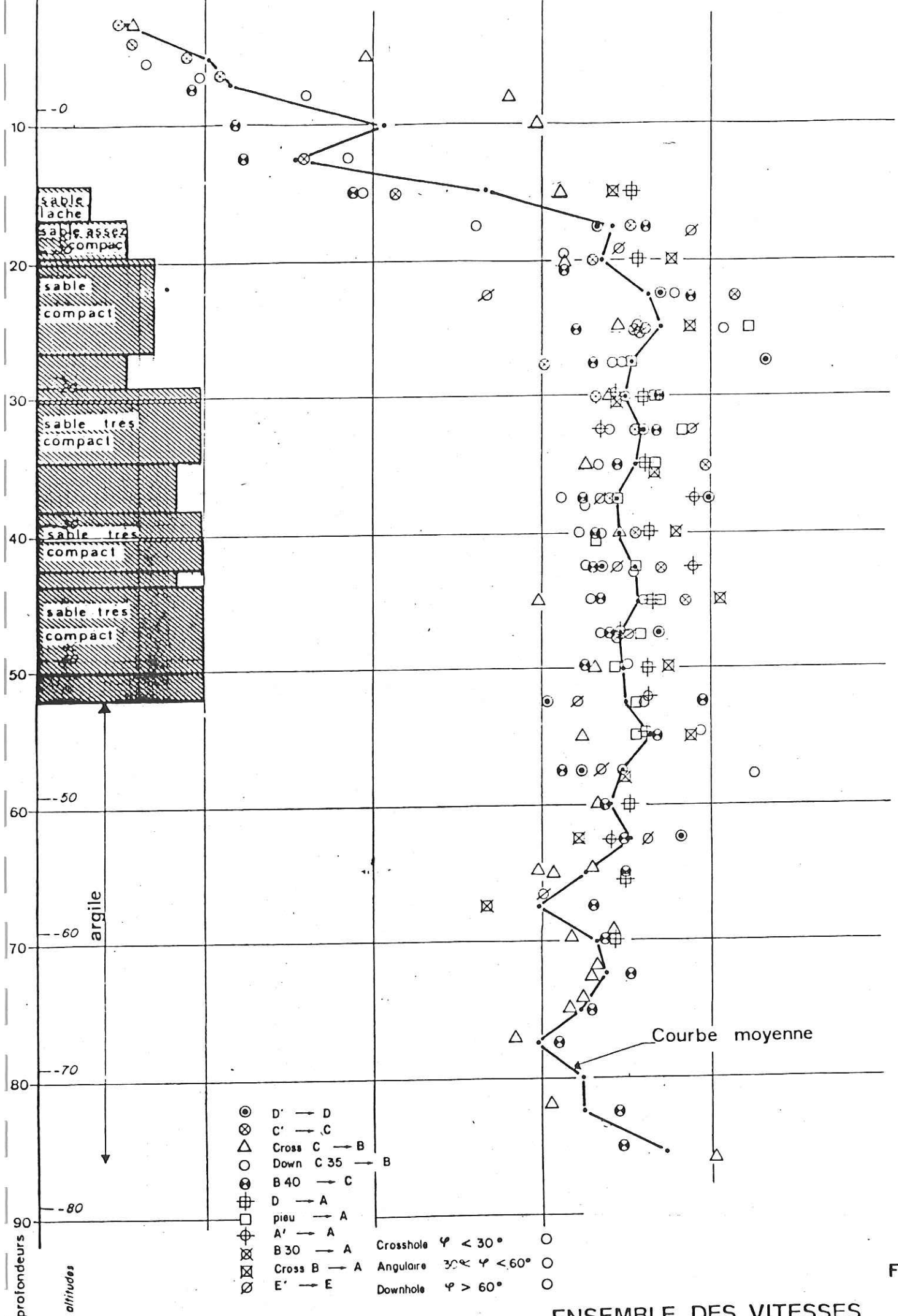


FIG. 4



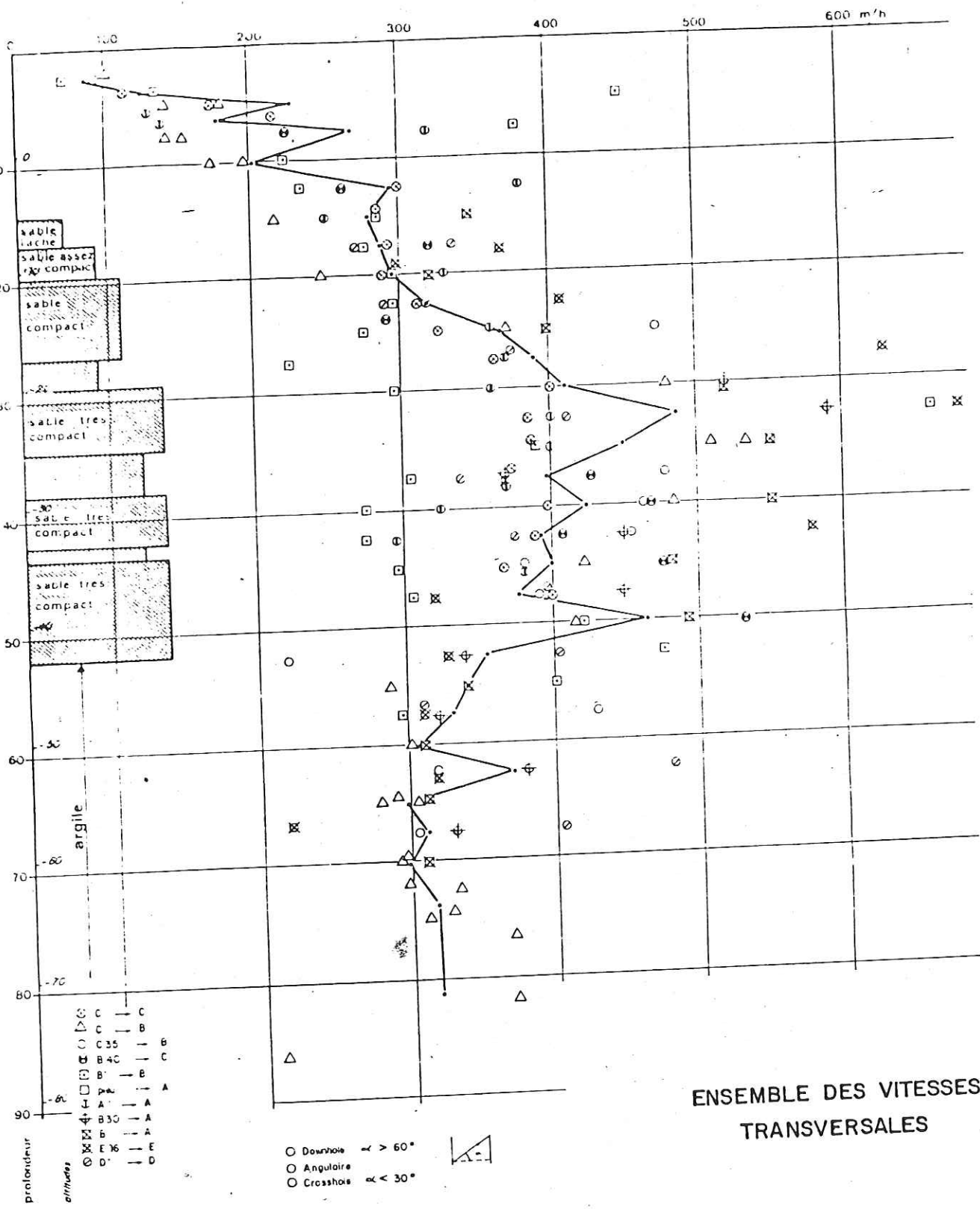
DOWN HOLE E'16 → E
 CAPTEUR HORIZONTAL

FIG 5



- ⊙ D' → D
 - ⊗ C' → C
 - △ Cross C → B
 - Down C 35 → B
 - ⊕ B 40 → C
 - ⊞ D → A
 - pieu → A
 - ⊕ A' → A
 - ⊗ B 30 → A
 - ⊞ Cross B → A
 - ⊗ E' → E
- Crosshole $\psi < 30^\circ$
 ○ Angulaire $30^\circ < \psi < 60^\circ$
 ○ Downhole $\psi > 60^\circ$

ENSEMBLE DES VITESSES LONGITUDINALES



ENSEMBLE DES VITESSES TRANSVERSALES

FIG. 7

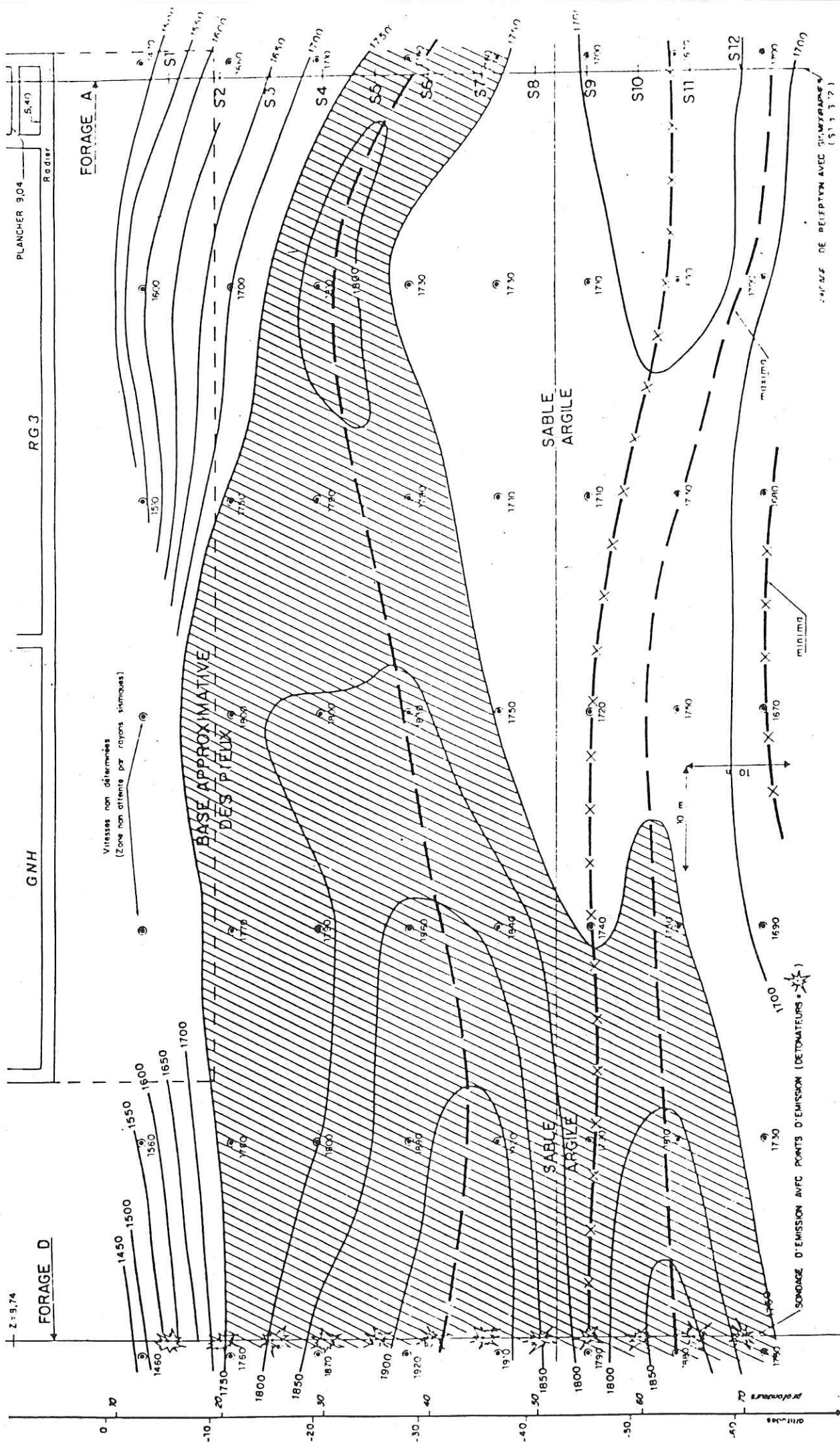


FIG. 8
PANNEAU SISMIQUE SOUS LA CENTRALE (VITESSES LONGITUDINALES)

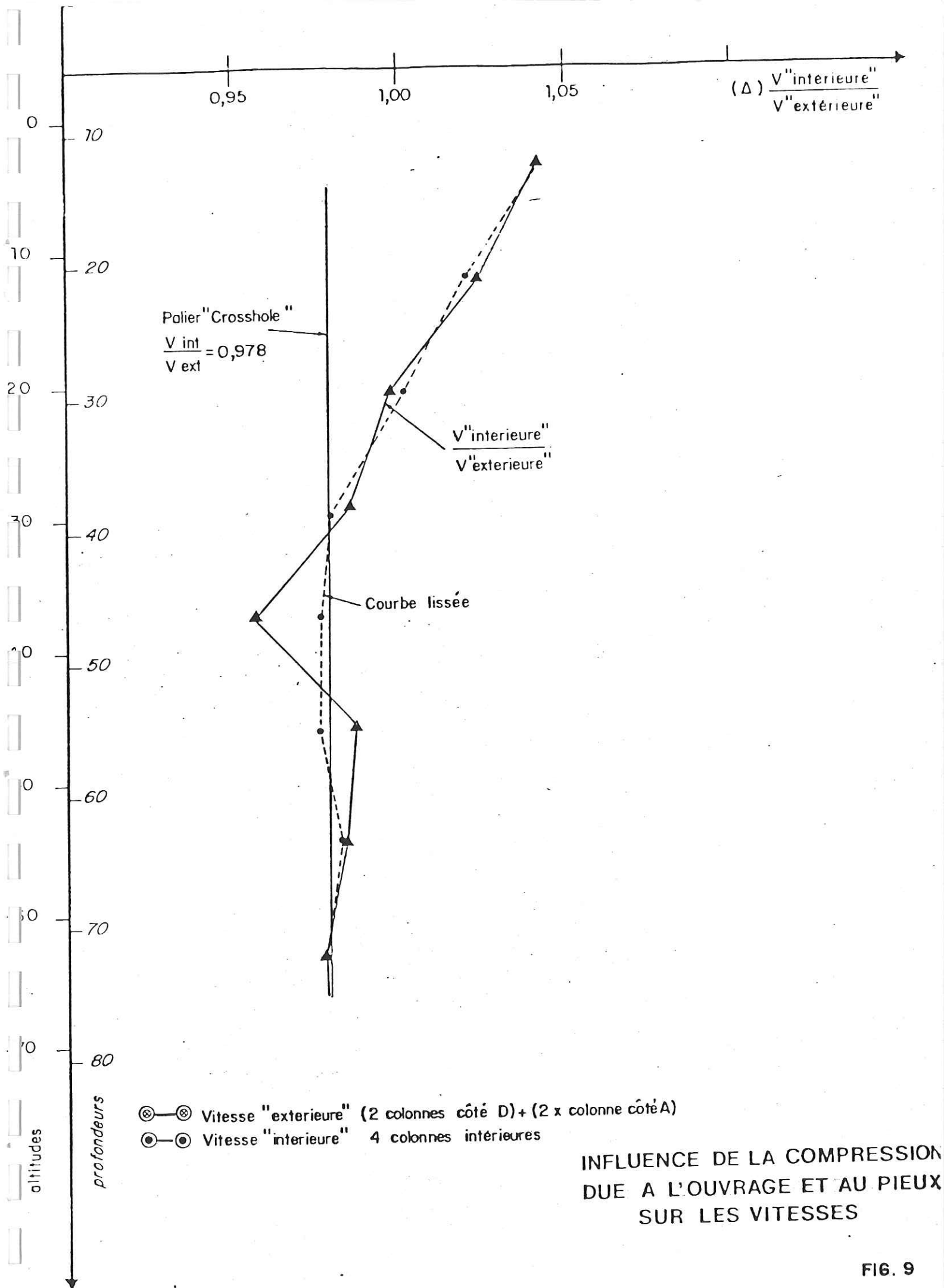
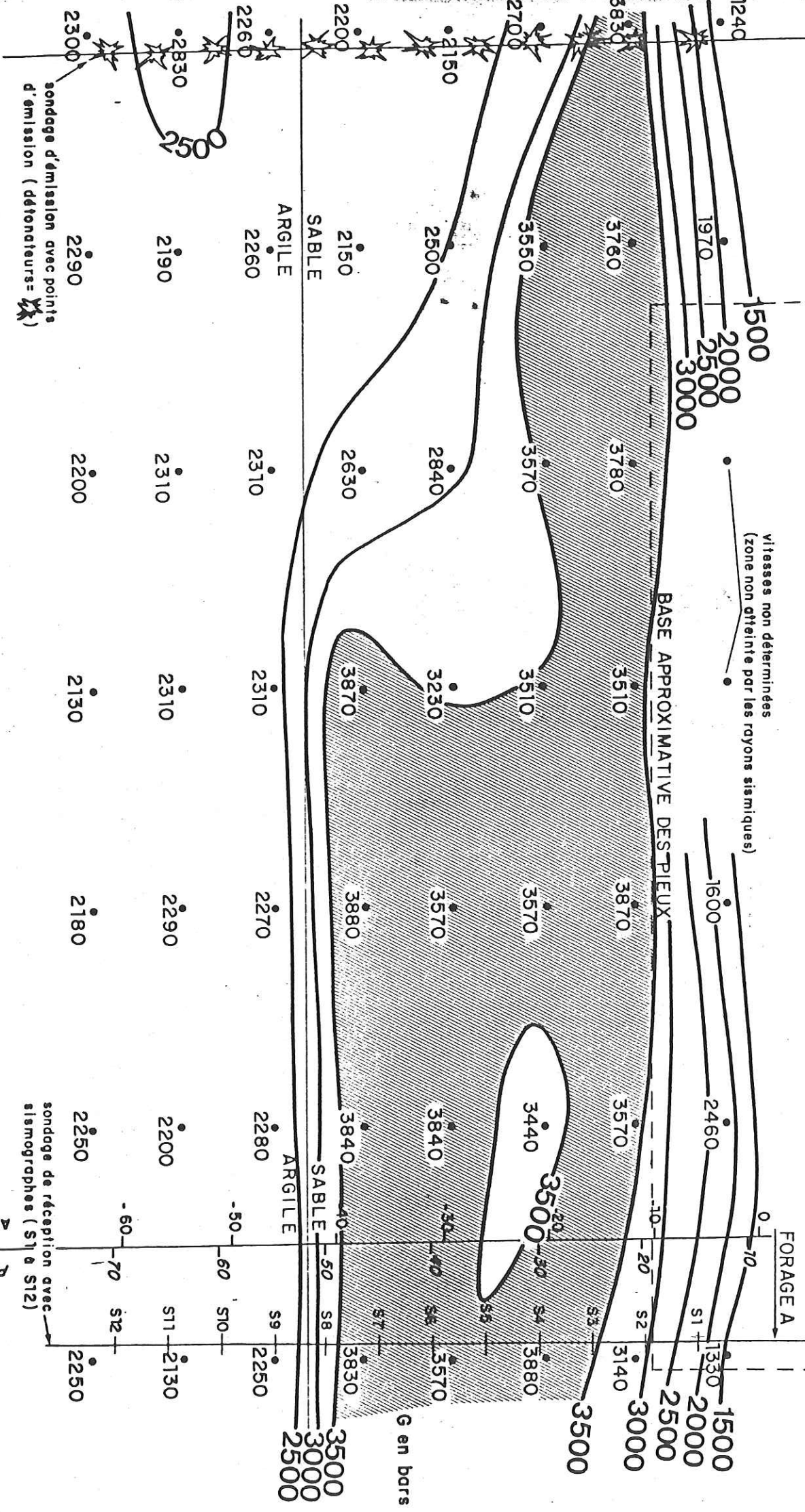


FIG. 9



sondage d'émulsion avec points
d'émulsion (détonateurs =)

sondage de réception avec
sismographes (S1 à S12)

Altitudes

Profondeurs

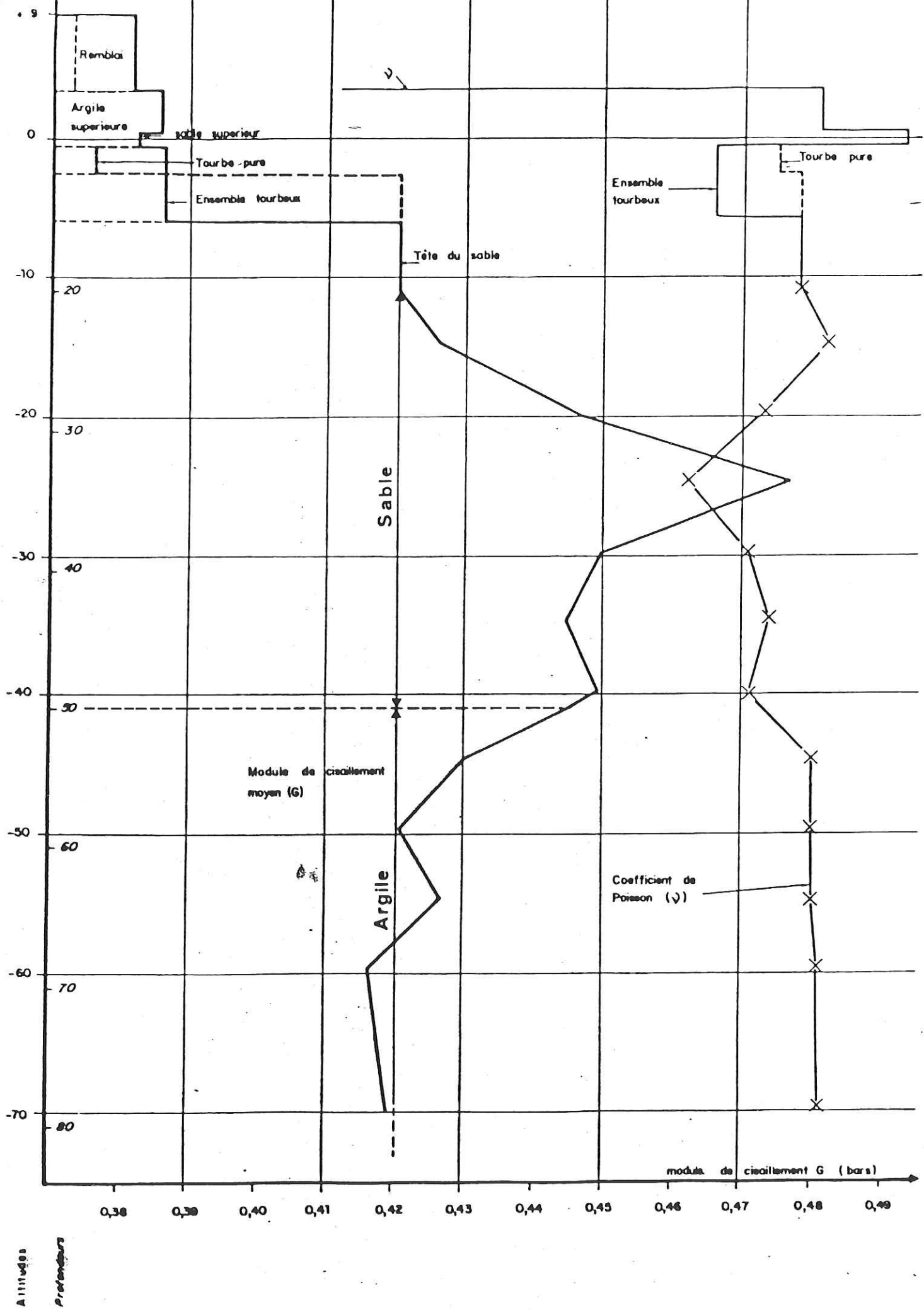


FIG.11