

P19

MESURES SISMIQUES PAR TRANSMISSION—APPLICATION AU GENIE CIVIL*

PAR

M. LA PORTE**, J. LAKSHMANAN***, M. LAVERGNE** et
C. WILLM****

ABSTRACT

LA PORTE, M. J., LAKSHMANAN, M. LAVERGNE and C. WILLM, 1973, Seismic Measurements by Transmission—Application to Civil Engineering, Geophysical Prospecting 21, 146-157.

The new process of automatic determination of seismic velocities by well to well measurements (Bois et al., 1971, Geophysical Prospecting 19, 42-73) gives the possibility to increase the knowledge of oil reservoirs, by detecting large inhomogeneities between wells. It can also give useful informations on the mechanical properties of rocks in mining exploitation and civil engineering, by gallery to gallery measurements. An application of the method is given to the search for the proper location of an underground hydroelectric power plant, where the problem was to investigate the rock properties in a horizontal plane between two exploration galleries.

RÉSUMÉ

Le nouveau procédé de détermination automatique des vitesses sismiques par mesures entre puits (Bois et al., 1971, Geophysical Prospecting 19, 42-73) permet d'améliorer la connaissance des réservoirs pétroliers en détectant les hétérogénéités importantes entre les puits. Il permet également, par mesures entre galeries, d'obtenir des indications précieuses sur les propriétés mécaniques des terrains en exploitation minière et en génie civil. On donne un exemple d'application de cette méthode à l'étude de l'implantation d'une centrale hydroélectrique souterraine, où il s'agissait d'étudier les caractéristiques du terrain dans le plan horizontal séparant deux galeries de reconnaissance.

I. INTRODUCTION

Le procédé de détermination automatique des vitesses sismiques par transmission permet d'améliorer la connaissance des réservoirs pétroliers en détectant les hétérogénéités importantes entre les puits.

* Communication présentée au 34ème Congrès de l'E.A.E.G., juin 1972 à Paris.

** Institut Français du Pétrole, 92, Rueil-Malmaison.

*** Compagnie de Prospection Géophysique Française, 92, Rueil-Malmaison.

**** Bureau d'Etudes Industrielles et de Coopération de l'Institut Français du Pétrole (BEICIP), 92, Rueil-Malmaison.

Le principe de la méthode et le processus de calcul ont été publiés par Bois, La Porte, Lavergne et Thomas en 1971 et une application à un gisement pétrolier a été récemment publiée par les mêmes auteurs (Bois, La Porte, Lavergne et Thomas 1972).

L'objet de la présente étude est de montrer que le procédé peut également être appliqué à l'exploitation minière, au génie civil et à l'hydrologie, et qu'il permet, par la détermination des vitesses sismiques „in situ”, d'obtenir des indications précieuses sur la nature des terrains et sur leurs propriétés mécaniques.

Rappelons brièvement le principe du procédé de détermination automatique des vitesses sismiques par transmission. Supposons que des tirs sismiques soient effectués le long d'un puits ou d'une galerie, et éventuellement en surface, et que des géophones soient échelonnés le long d'un autre puits ou d'une autre galerie.

Les enregistrements obtenus correspondent à des rayons qui ont traversé en tous sens la zone étudiée. On va donc pouvoir en traitant sur ordinateur les temps de première arrivée de ces rayons en déduire des renseignements sur les vitesses sismiques des différents terrains situés dans cette zone.

Le problème est résolu par une méthode itérative basée sur un processus de moindres carrés avec contraintes. La méthode est exposée en détail dans l'article de Bois et al. (1971). Elle consiste à se donner a priori un schéma de départ pour les vitesses, à calculer les temps de première arrivée correspondant à ce schéma, à les comparer aux temps expérimentaux et à partir des désaccords constatés à retoucher le schéma de départ, à recommencer le calcul à partir du schéma modifié, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la différence entre les temps calculés et les temps mesurés soit suffisamment petite. Pratiquement le calcul s'arrête automatiquement lorsque l'écart entre temps calculés et mesurés est de l'ordre de grandeur de l'erreur expérimentale.

Pour définir la fonction vitesse $V(x, y)$ on couvre la zone étudiée par un réseau régulier, on prend pour données de base les valeurs de la vitesse aux sommets du réseau, et on utilise un procédé d'interpolation qui assure la continuité de la fonction vitesse et de ses dérivées.

Le procédé de calcul mène vers une solution adoucie, dans laquelle les discontinuités et les ruptures de pente sont émoussées, mais qui a l'avantage d'être peu sensible aux paramètres du calcul, en particulier au schéma de départ et à la nature du réseau, pourvu que celui-ci soit suffisamment serré.

Le temps de calcul, pour une cinquantaine de rayons sismiques, est d'environ 2 minutes par itération sur ordinateur Control Data 6600 et il faut généralement 2 à 6 itérations pour aboutir à une solution.

La méthode est limitée jusqu'à présent au cas de deux dimensions, autrement dit elle suppose que les rayons restent dans le plan de figure.

Seuls sont considérés les instants des premières arrivées des ondes se propageant aux vitesses de compression, mais la méthode pourrait traiter aussi bien le cas des vitesses de cisaillement. Enfin, on peut tenir compte de l'anisotropie lorsque cela est nécessaire.

II. APPLICATION A L'ETUDE D'UN SITE DE BARRAGE

A) Définition du problème

La méthode a été appliquée à l'étude de l'implantation d'une centrale hydroélectrique souterraine en République du Zaïre. Dans le cadre de l'aménagement hydroélectrique du Lualaba, il est prévu de construire à Busanga, dans les gorges de Zilo, à la sortie du massif des Kirabas, un barrage voûte de 130 mètres de hauteur et une centrale souterraine de 220 mégawatts (fig. 1).

Des essais de comportement mécanique des terrains, effectués pour déterminer le site d'implantation optimal du barrage et de la centrale souterraine, sont décrits par Lechat, Monjoie et Lemoine (1971).

Des mesures de vitesses sismiques longitudinales et transversales ont été faites le long des galeries G_8 , G_9 , G_{10} et G_{11} pour déterminer les modules d'élasticité dynamiques des terrains sur les différents sites possibles du barrage. Des mesures pressiométriques ont été effectuées sur une trentaine de forages de 5 mètres de profondeur moyenne pour déterminer les modules d'élasticité statiques. Les zones où les modules d'élasticité ont des valeurs relativement élevées sont saines et inversement. C'est ainsi que sur la figure 1, la zone en pointillés située sur la rive gauche du Lualaba, au NE de Bar 1, qui présente des modules dynamiques de l'ordre de 130 000 bars, est déconsolidée.

Des mesures de vitesses longitudinales le long des galeries G_3 et G_4 , et des essais de transmission ont été effectués pour déterminer le site d'implantation optimale de la centrale souterraine.

Nous nous bornons dans ce qui suit à l'interprétation des mesures sismiques par transmission entre les galeries G_3 et G_4 , avec pour objet la détermination des caractéristiques du terrain dans le massif entouré par ces galeries.

C'est dans ce massif qu'il est prévu de construire la centrale souterraine qui doit avoir 100 mètres de longueur, 20 mètres de largeur, et 40 mètres de hauteur. L'épaisseur de la couverture, c'est-à-dire de l'ensemble des terrains situés entre le toit de la centrale et le jour, sera comprise entre 50 et 100 mètres. Le site est relativement fracturé, le massif est constitué de quartzophyllades rubannés, affectés de failles et de diaclases.

Le problème de l'implantation optimale de la centrale souterraine revient essentiellement à déterminer une zone où les terrains ont une bonne qualité mécanique, pour éviter les risques d'éboulement de la voûte.

Les mesures géophysiques de Lechat et al. (1971) ont montré que les vitesses

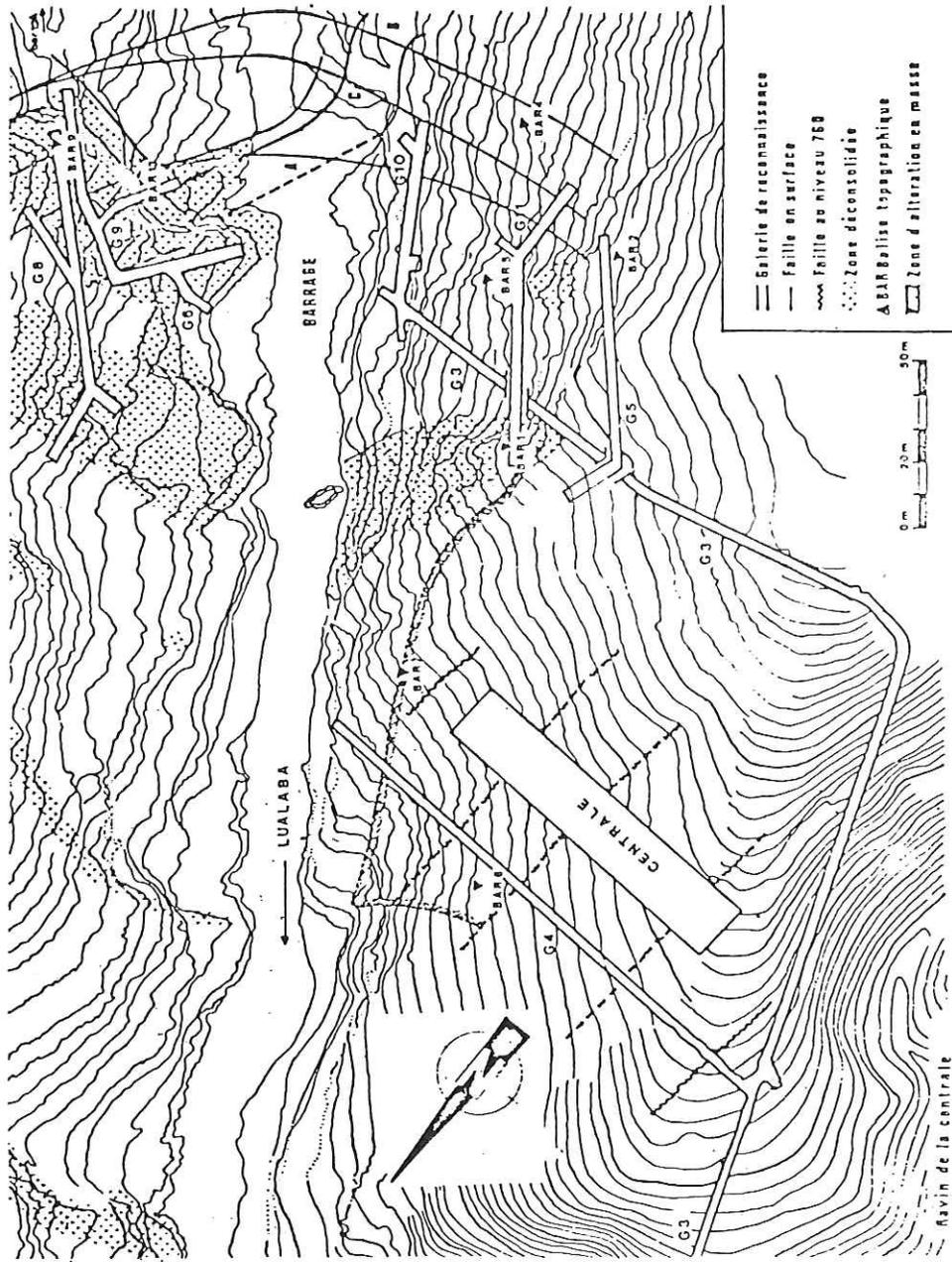


Fig. 1. Plan montrant les emplacements envisagés pour l'implantation du barrage et de la centrale souterraine de Busanga, et l'emplacement des galeries de reconnaissance. (Détail d'une figure tirée de Lechat, Monjot et Lemoine, 1971).

Map showing possible sites for the dam and the underground power plant of Busanga, and the actual location of the exploration galleries. (Detail from a map by Lechat, Monjot and Lemoine 1971)

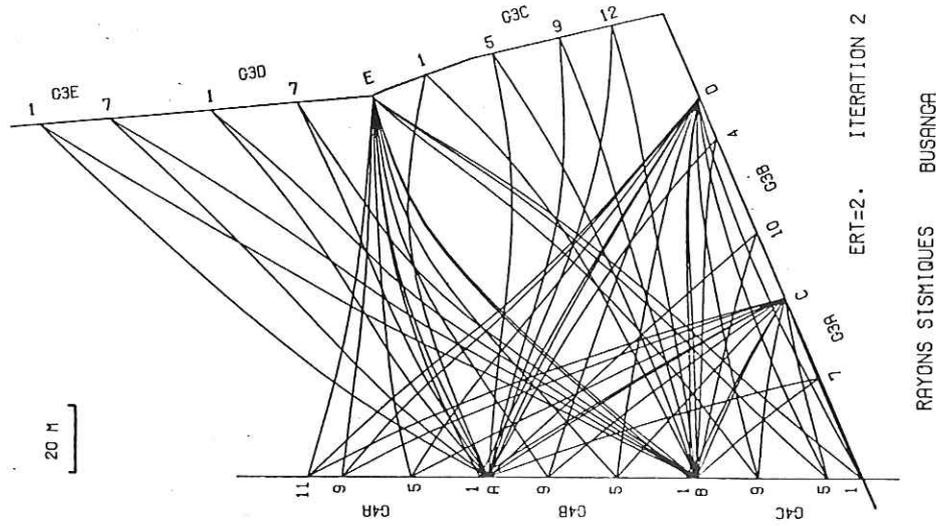


Fig. 3. Tracé des rayons sismiques correspondant à la distribution de vitesses de la figure 5. Les emplacements A, B, C, D, E, indiqués par des lettres, sont les points de tir; les emplacements indiqués par des chiffres sont des points de détection. Seismic rays obtained for the velocity distribution of fig. 5. Shot positions A, B, C, D, E are indicated by letters; detection points are indicated by numbers.

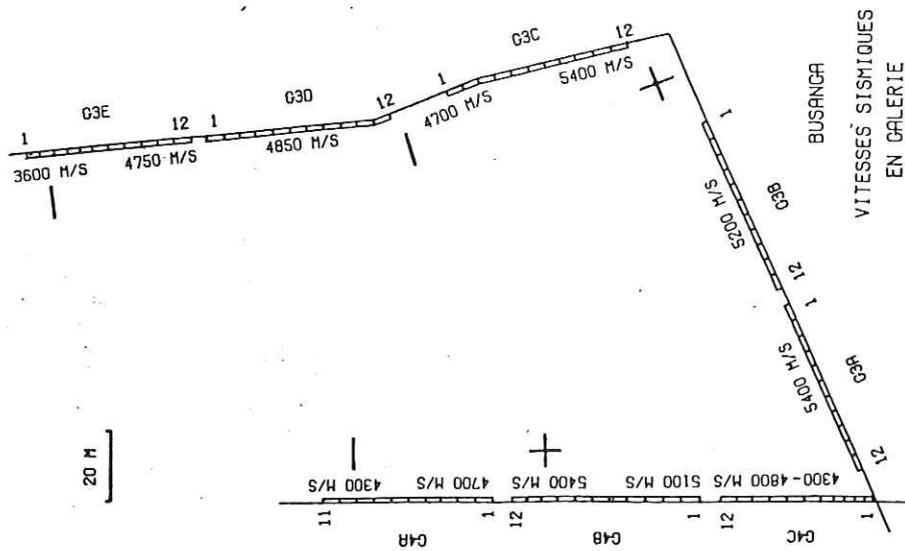


Fig. 2. Résultat des mesures des vitesses longitudinales effectuées par sismique réflexion le long des galeries G₃ et G₄ (D'après Lechat et al. 1971). Longitudinal velocities obtained by refraction seismic measurements along galleries G₃ and G₄ (after Lechat et al. 1971).

longitudinales variaient dans le massif de la centrale souterraine entre 4000 et 6000 m/s, avec une anisotropie dans le sens du pendage et de la schistosité de coefficient $K = 1,08$. Les zones à vitesse élevée sont caractéristiques de terrains de bonne tenue, tandis que les zones à vitesse faible sont caractéristiques de roches fissurées ou de zones faillées. La détermination de la qualité mécanique des terrains revient donc à déterminer des zones à vitesses fortes et des zones à vitesses faibles.

Les mesures des vitesses longitudinales le long des galeries par sismique réfraction avaient déjà permis (Lechat et al. 1971) de déterminer des zones à vitesse forte et des zones à vitesse faible au voisinage immédiat des galeries (fig. 2). Les mesures par transmission vont permettre d'étendre ces résultats aux terrains situés entre les galeries, et de déterminer les vitesses „in situ” dans toute la portion du plan horizontal située entre les galeries.

B) *Interprétation des mesures par transmission*

Les mesures par transmission entre les galeries G_3 Est-Ouest, G_3 Nord-Sud et G_4 ont été interprétées avec le programme de Bois et al. (1971).

TABLEAU I

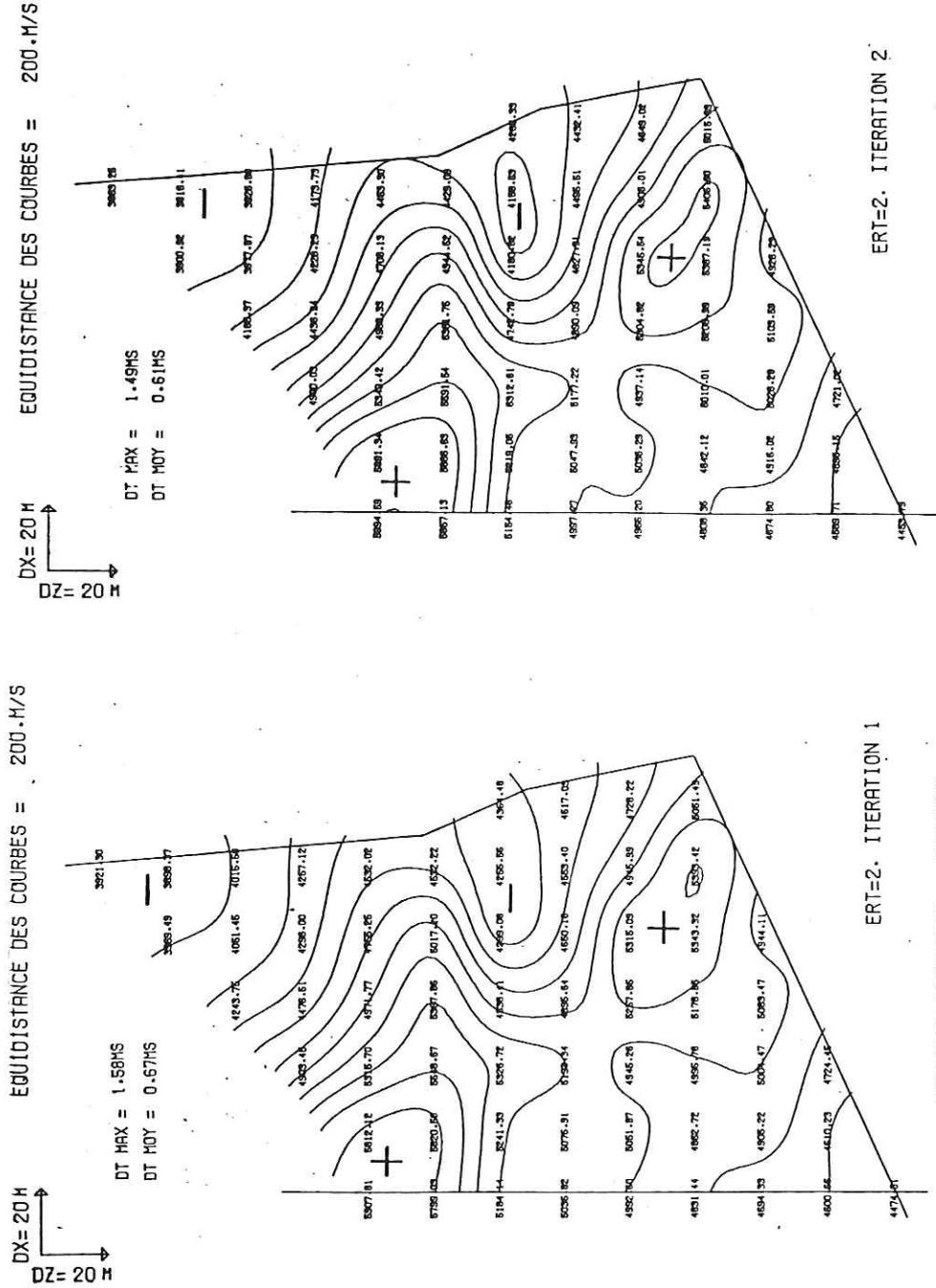
	G_{4a}				A	G_{4b}				B	G_{4c}		
	11	9	5	1		9	5	1	9		5	1	
G_{3e} 1					36					46			
G_{3e} 7					33					42,5			
G_{3d} 1					27,75					35,75			
G_{3d} 7					24,5					32,5			
E	20	19,5	20	22,75	23,25	25,25	27,75	31,25	32	33,75	36	38	
G_{3c} 1					25,75					29,75			
G_{3c} 5					25,50					28			
G_{3c} 9					26,50					27			
G_{3c} 12					27,25					26,25			
D	28,5	26,5	24,5	23,75	24	22,75	22,25	21,25	21,50	22,75	24,25	25,5	
G_{3b} 4					23					20			
G_{3b} 10					19,25					13,75			
C	29	26,5	24	20,25	20,25	17,25	14,25	11,75	11,75	10,75	10,75	13	
G_{3a} 7					20					10,5			

Temps des premières arrivées mesurés par transmission sismique entre les galeries G_3 Est-Ouest, G_3 Nord-Sud et G_4 .

Les points A, B, C, D, E, sont les points de tir.

Les autres sont les points de détection.

Les temps sont exprimés en millisecondes. Les erreurs expérimentales sont inférieures à 2 millisecondes.



VITESSES SISMIQUES BUSANGA

Fig. 4.

Figs. 4 et 5. Solutions obtenues pour les vitesses après 1 et 2 itérations, sans tenir compte de l'anisotropie, en supposant que l'erreur expérimentale n'exécède pas 2 millisecondes.

Solutions obtained for the velocity distribution after 1 and 2 iterations, without taking account of anisotropy, and with the hypothesis that the experimental error does not exceed 2 milliseconds.

VITESSES SISMIQUES BUSANGA

Fig. 5.

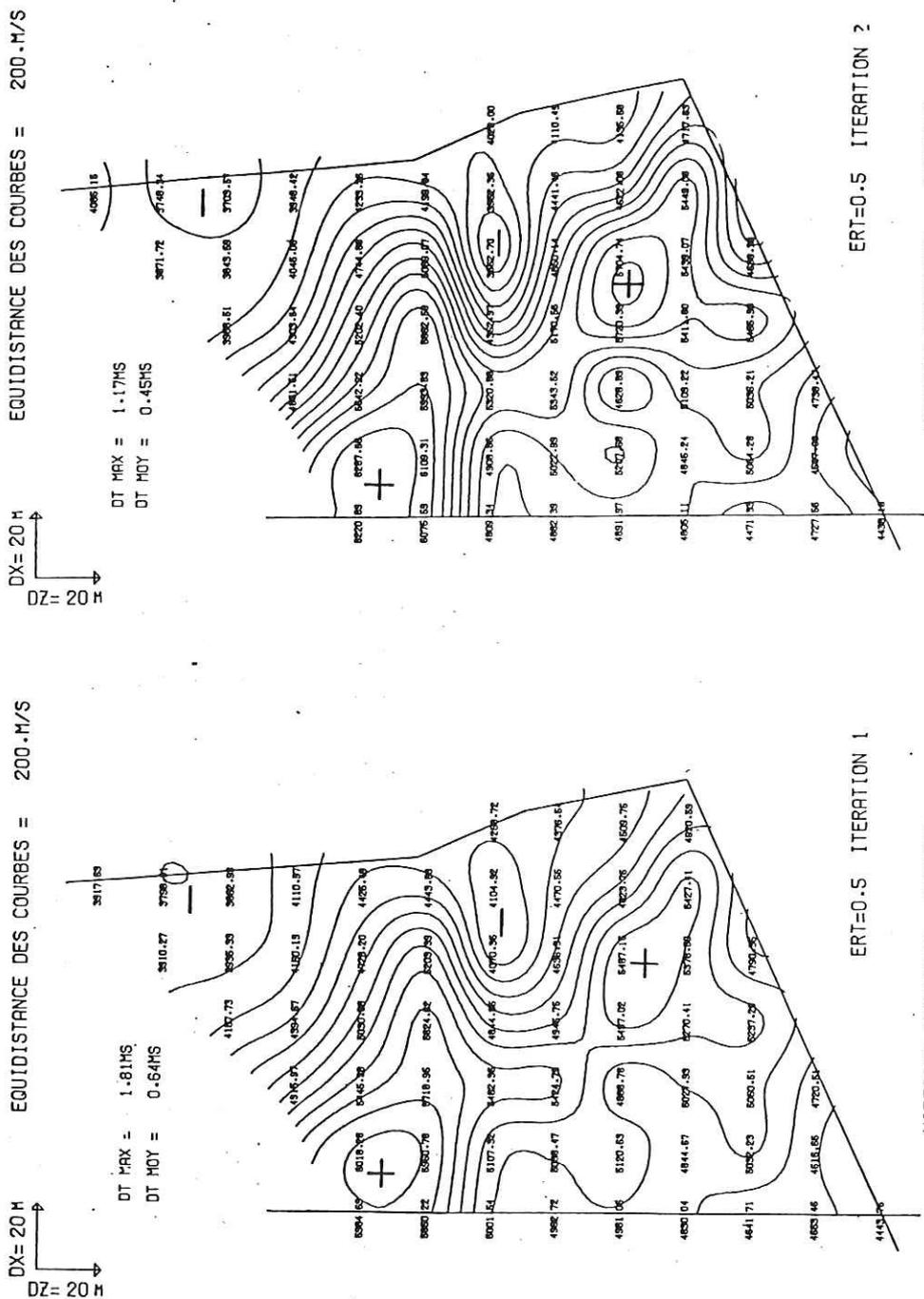


Fig. 6. Solutions obtenues pour les vitesses apres 1, 2 et 3 iterations, sans tenir compte de l'anisotropie, en supposant que l'erreur experimentale n'excede pas 0,5 milliseconde.

Fig. 7. Solutions obtained for the velocity distribution after 1, 2 and 3 iterations, without taking account of anisotropy, and with the hypothesis that the experimental error does not exceed 0,5 millisecond.

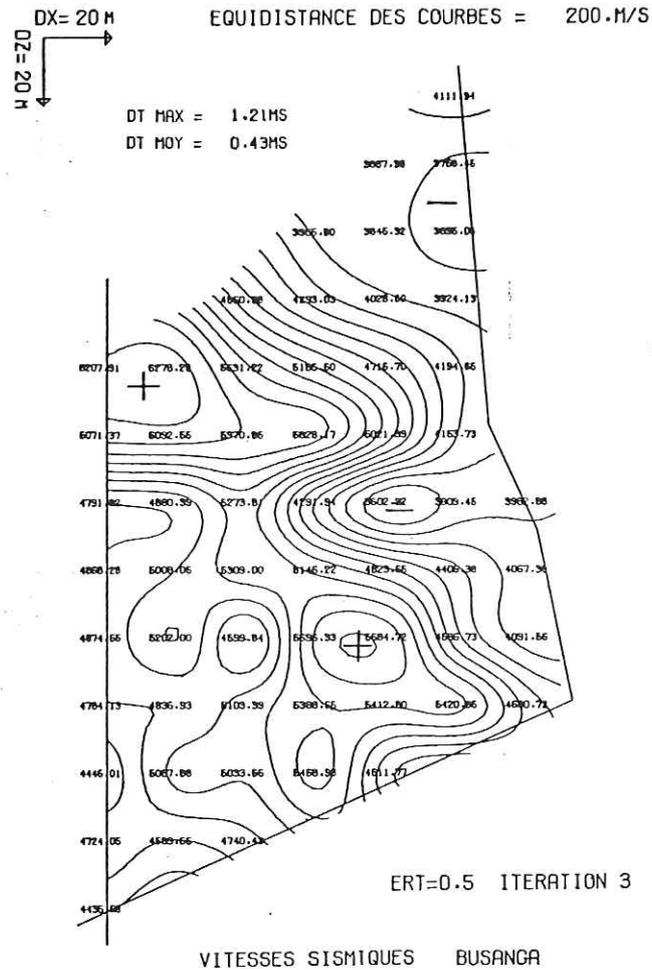


Fig. 8.

Les points de tir et de détection sont indiqués sur la fig. 3; on a retenu 58 rayons au total. Les temps des premières arrivées sismiques introduites comme données sont indiqués sur le tableau 1. On a pris comme réseau de départ un schéma à vitesse constante $V = 5000$ m/s.

La figure 3 représente la géométrie des rayons après 2 itérations, et les figures 4 et 5 la solution obtenue pour les vitesses après 1 et 2 itérations, sans

tenir compte de l'anisotropie, en supposant que l'erreur expérimentale n'excède pas 2 millisecondes. Le calcul a été poussé jusqu'à la deuxième itération, mais dès la première, l'écart maximal entre temps mesurés et temps calculés est déjà inférieur à l'erreur expérimentale; cet écart maximal, noté DT MAX sur les figures, est donné en millisecondes.

Les figures 6, 7 et 8 représentent les solutions obtenues en supposant que l'erreur expérimentale n'excède pas 0,5 milliseconde. On voit que le réseau se creuse artificiellement, le passage de valeurs de 3600 m/s à des valeurs de près de 5700 m/s en l'espace de 50 mètres n'étant pas vraisemblable. Ce phénomène tient à ce que l'erreur expérimentale a été sous-estimée, et qu'elle est en fait nettement supérieure à 0,5 milliseconde.

La figure 9 représente la géométrie des rayons, et la figure 10 la solution obtenue pour les vitesses après 2 itérations, en tenant compte de l'anisotropie, et en supposant que l'erreur expérimentale n'excède pas 2 millisecondes. On a introduit ici pour tenir compte de la réalité géologique, une anisotropie de coefficient $K = 1,08$, les vitesses maximales V_{max} étant prises dans le sens du pendage et de la schistosité (direction NE-SW), et les vitesses minimales V_{min} dans la direction perpendiculaire,¹ conformément aux mesures géophysiques de Lechat et al. (1971).

La solution donnée par la fig. 10 est probablement la solution la plus conforme à la réalité, car elle tient compte à la fois de l'anisotropie et d'une erreur expérimentale probable de 2 millisecondes.

On voit que la répartition des zones à vitesses rapides et des zones à vitesses lentes entre les galeries est tout à fait compatible avec les observations faites par réfraction le long des galeries (cf. figures 2 et 10), à quelques exceptions près, en particulier à l'extrémité Est de la galerie G_4 , où les vitesses déterminées au voisinage de la galerie sont relativement faibles (fig. 2) alors que les vitesses déterminées plus profondément à l'intérieur du massif sont relativement élevées (figure 10). Ceci est peut-être dû au fait que la galerie G_4 débouche à l'air libre en $G_4 A_{11}$ dans la falaise qui domine le Lualaba, et que les terrains sont particulièrement déconsolidés autour des galeries qui débouchent dans cette falaise. Il est possible également que la déconsolidation des terrains autour de $G_4 C$ vienne perturber les mesures par transmission dans le coin $G_3 A - G_4 C$.

Quant à la zone à faible vitesse mise en évidence vers l'extrémité Est de la galerie G_3 , elle est en accord avec les mesures du module d'élasticité de Lechat et al. (1971) qui ont trouvé des valeurs relativement faibles, caractéristiques de zones déconsolidées.

¹ Sur les figures 2 à 10, le Nord est dirigé vers la gauche, perpendiculairement à la galerie G_4 .

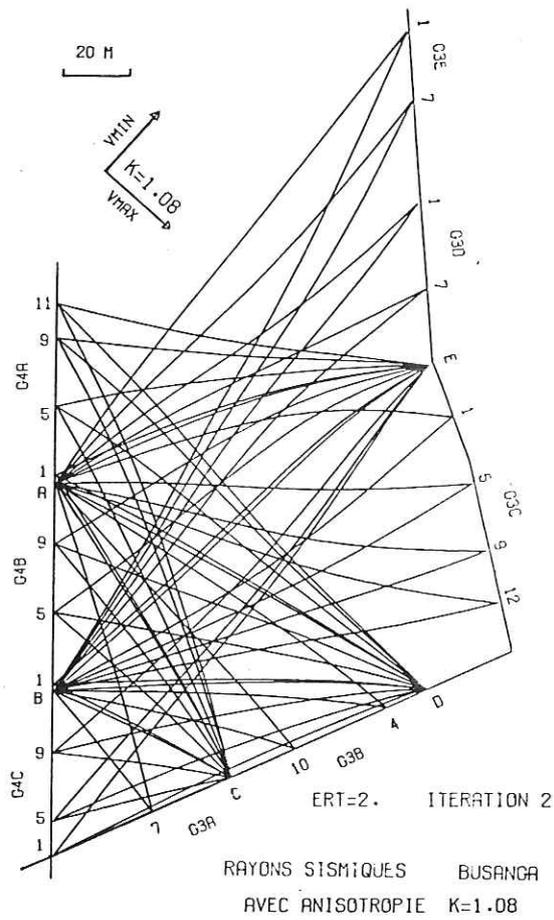


Fig. 9. Tracé des rayons sismiques correspondant à la distribution des vitesses de la figure 10, où l'on a tenu compte d'une anisotropie de coefficient $K = 1.08$ dans la direction NE-SW.

Seismic rays obtained for the velocity distribution of fig. 10, with anisotropy directed NE-SW. The anisotropy coefficient is $K = 1.08$.

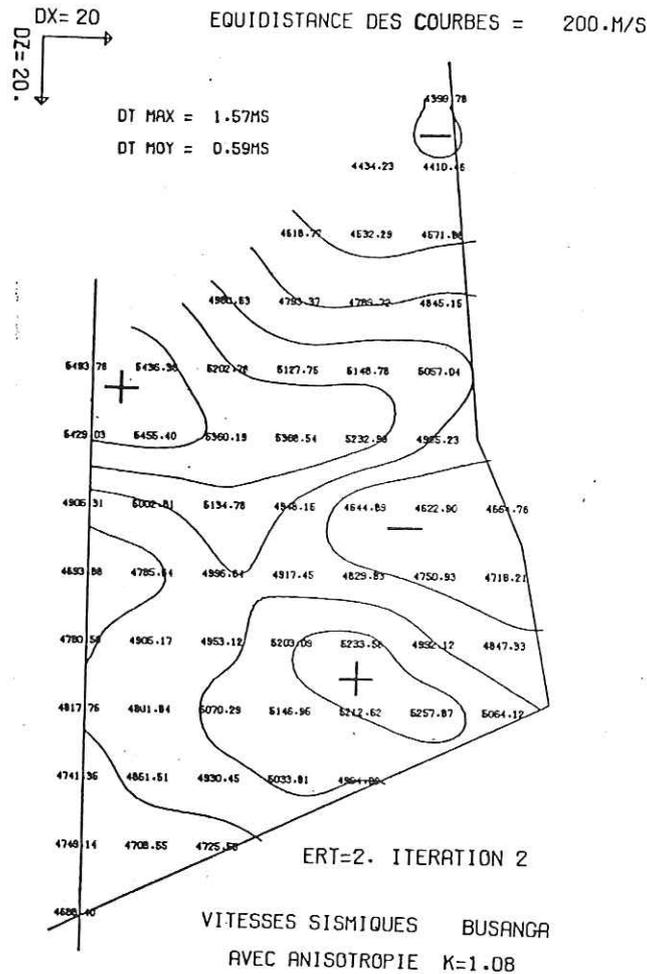


Fig. 10: Solution obtenue pour les vitesses après 2 itérations, en tenant compte de l'anisotropie, et en supposant que l'erreur expérimentale n'excède pas 2 millisecondes. La vitesse représentée sur le réseau est sensiblement la moyenne de la vitesse maximale et de la vitesse minimale suivant les directions principales de l'anisotropie. Le coefficient d'anisotropie est de 1,08. La vitesse est maximale dans la direction NE-SW, et minimale dans la direction perpendiculaire (cf. fig. 9). Sur les figures 2 à 10, le Nord est dirigé vers la gauche de la figure, perpendiculairement à la galerie G₄.

Solution obtained for the velocity distribution after 2 iterations, with anisotropy directed NE-SW, and with the hypothesis that the experimental error does not exceed 2 milliseconds. The velocity values indicated on the network are roughly the average of the maximum and minimum velocity values along the principal axes of anisotropy. Anisotropy coefficient is $K = 1.08$. Velocities are maximum along the NE-SW and minimum along the NW-SE directions (cf. fig. 9). On figures 2 to 10, the North direction is leftward, perpendicular to the G₄ gallery.

III. CONCLUSION

Les mesures sismiques par transmission à travers le site prévu pour l'implantation de la centrale souterraine de Busanga, ont permis de déterminer des zones à vitesses relativement élevées et des zones à vitesses relativement faibles, qui sont caractéristiques de terrains de plus ou moins bonne tenue. Ces calculs ont confirmé dans une certaine mesure et complété les résultats obtenus au voisinage immédiat des galeries par essais pressiométriques et par sismique réfraction, et ont permis de préciser la zone d'implantation optimale de la centrale.

Cet exemple montre que le procédé de détermination automatique des vitesses sismiques par transmission peut être appliqué au génie civil, à l'hydrologie et à l'exploitation minière. Il peut, par des mesures entre galeries ou des mesures galeries-surface, donner des indications précieuses sur les hétérogénéités latérales et verticales, et sur les qualités mécaniques des terrains et des recouvrements.

BIBLIOGRAPHIE

- BOIS, P., LA PORTE, M., LAVERGNE, M., THOMAS, G., 1971, Essai de détermination automatique des vitesses sismiques par mesures entre puits, *Geophysical Prospecting* 19, 42-83.
- BOIS, P., LA PORTE, M., LAVERGNE, M., THOMAS, G., 1972, Well to well seismic measurements, *Geophysics* 37, 471-480.
- LECHAT, P., MONJOIE, A., LEMOINE, Y., 1971, Apport des études sismiques et pressiométriques à l'étude de la fracturation du rocher dans le cas d'un site de barrage. Symposium de la Société Internationale de Mécanique des Roches, Oct. 71, Nancy.