

P17

NANCY 1971

Written Contribution - Contribution Ecrite - Schriftlicher Beitrag

P. LECHAT, A. MONJOIE, Y. LEMOINE

Apports des études sismiques et pressiométriques à l'étude de la fracturation du rocher dans le cas d'un site de barrage.

Contribution of seismic and pressiometric methods to the investigation of rock fissuration on dam sites.

Beitrag der Sismischen- und Druckmessungsstudien im Hinblick der Gesteinsbrechung im Falle einer Sperre.

RESUME

A propos d'un barrage prévu dans un site relativement fracturé, les auteurs examinent les résultats recueillis à la suite d'une reconnaissance traditionnelle : levés de terrain, forages, galeries. Ils analysent ensuite les différentes techniques destinées à chiffrer ces observations : géosismique et géomécanique.

Enfin les résultats obtenus étant comparés à ceux de la géologie, des niveaux de fondations peuvent être définis.

SUMMARY

During the investigation of a dam site in fractured rock, the authors first examine the results obtained by conventional procedure : field geology adits drilling. They then analyse the different quantitative techniques used in situ: geotechnical measurements and geophysics. Finally these measurements are compared with the geological observations, and the foundation level defined.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Hinblick auf eine an einem verhältnismässig zersplitterten Ort vorgesehene Sperre werden die Fachleute die Erkenntnisse prüfen, die man infolge traditioneller Untersuchungen gewonnen hat : Bodenmessungen, Tiefbohrungen, Strecken. Alsdann werden die verschiedenen technischen Methoden untersucht, um diese Beobachtungen in Ziffern zu verwandeln: Bodensismik und Bodenmechanik.

Schliesslich werden die erhaltenen Ergebnisse mit denen der Geologie verglichen und die Fundamentsohlen können dann festgestellt werden.

I - INTRODUCTION

A propos des communications de C.D. DA GAMA (Studying rock fractures by wave attenuation methods) et A.G. LYKOSHIN, S.G. YASCHENKO, A.D. MIKHAILOV, A.I. SAVITCH et V.J. KOPKEV (investigation of rock jointing by Seismo-acoustic methods), il nous a paru intéressant de confronter très récemment sur un site de barrage en République Démocratique du Zaïre, où l'observation visuelle de la fracturation du massif a été précisée par des mesures sismiques et pressiométriques.

La Centrale de BUSANGA constitue le quatrième étage du plan d'aménagement hydroélectrique du Lualaba dans les Gorges de ZILO en R.D.Congo. Il est prévu d'y réaliser un barrage-voûte de 130 m de haut environ et une centrale souterraine de 220 Mw environ. Le tronçon du fleuve étudié spécialement pour le site du barrage est situé dans les Gorges de KATANDA à hauteur des derniers rapides du Lualaba, à la sortie du massif des KIBARAS. Le fleuve a un tracé pratiquement rectiligne orienté N/ 25°/W sur une longueur de 1.100 m, entre deux pools appelés respectivement "pool supérieur" et "pool inférieur".

Les rives sont particulièrement abruptes : La cote de niveau 1.000 s'approche à moins de 200 m de l'axe du fleuve situé à la cote 750 environ.

L'emplacement envisagé pour l'implantation du barrage se situe à environ 350m en amont du pool inférieur. La rive gauche y dessine un promontoire où est implantée la balise topographique "BAR 1" : la rive droite forme également une avancée depuis les balises BAR 13 - BAR 9 à l'amont jusque la balise BAR 14 à l'aval. Le fleuve a une largeur de 20 m en cet endroit (document 1).

L'emplacement retenu pour la centrale souterraine se trouve en rive gauche entre le LUALABA à l'Est, le ravin de la centrale à l'Ouest et à mi-distance entre le barrage et le pool inférieur où la restitution est prévue.

Les travaux de reconnaissance classique ont comporté outre un levé géologique détaillé de surface, 1.300 m de galeries couvrant la zone de la centrale au niveau 760, et les appuis du barrage sur les deux rives aux niveaux 760, 825 et 875, et environ 3.000 m de sondages carottés principalement concentrés dans la zone du barrage.

II - CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES DU MASSIF

Au site étudié, le massif des KIBARAS est formé par une série isoclinale homogène, de quartzophyllades rubanés avec quelques assises de quartzophyllades massifs. Les roches sont constituées d'une alternance de lits quartzitiques gris centimétriques à millimétriques et de lits phylladeux noirs décimétriques.

A - FRACTURATION

De nombreux joints, diaclases, failles de cisaillement affectent le massif. Ils ont fait l'objet d'études statistiques.

La stratification est nette dans les quartzophyllades rubanés, peu marquée dans les quartzophyllades massifs où elle est masquée par la schistosité. Elle est orientée N/5° à 30°/E - 40° à 65° NW.

La schistosité principale est très nette et très fine. Elle est oblique à la stratification et orientée assez uniformément N/40°E - 45° NW.

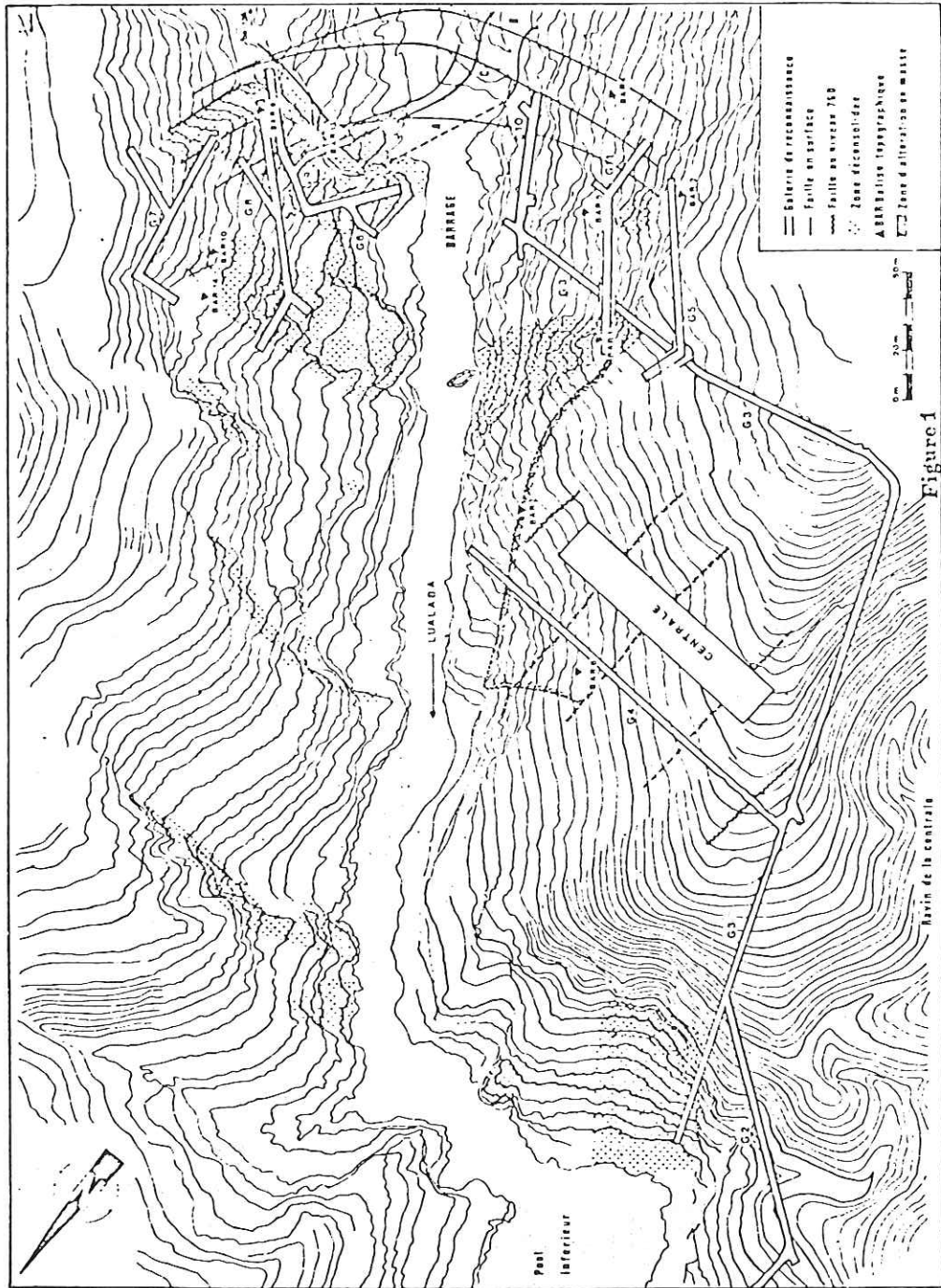


Figure 1

La schistosité secondaire se présente sous forme de microfissures distantes de quelques millimètres. Son orientation est variable:

- dans la zone du barrage, elle est orientée Sud-Nord avec un pendage moyen de 30° vers l'Est
- dans la zone de la centrale, elle est orientée N/40°/E - 20° à 30° E.

Les grandes diaclases se présentent suivant trois directions dominantes:

1. N.W. variant de N/40° à 70°/W - 80° S.W. à 80° N.E.
2. E.W. variant de N/70°/E à N/70°/W avec un pendage de 70°N à 85°S
3. N.E. variant de N/40° à 60°/E subvertical

Il existe un réseau 4 orienté N-S, mais sa fréquence est moindre.

Certaines diaclases ont des remplissages argileux de 5 à 20 cm d'épaisseur.

Les failles de cisaillement

17 failles principales ont été dénombrées depuis le site du barrage à l'amont jusqu'au pool de restitution à l'aval. Leur orientation est souvent parallèle à la stratification et quelquefois à la schistosité principale. Chacune d'elles est accompagnée de nombreux accidents satellites. Elles présentent généralement un remplissage de 0,50 à 1,00 m de catclasite argileuse, les accidents satellites ayant 5 à 20 cm de puissance.

L'appui rive gauche est particulièrement affecté par ces failles.

Il existe également dans le massif des réseaux mineurs de diaclases et des filons de quartz injectés dans les différents réseaux de joints.

B - PHENOMENES D'ALTERATION

Les nombreuses surfaces de discontinuité engendrent, compte-tenu de la morphologie de la vallée, un développement important des phénomènes d'altération mécanique et chimique des terrains.

Altération mécanique

Dans les gorges du fleuve, en rive gauche, les blocs découpés par la stratification et les grandes diaclases E - W et cisailés à la base par la schistosité secondaire ont tendance à basculer vers le vide. On observe clairement que toute la zone à l'Est des balises BAR 2 - BAR 1 a été décapée par altération mécanique suivant les joints: les phénomènes progressent dans le secteur à l'Est des balises BAR 1 - BAR 7. On y observe une falaise de 10 à 30 m de haut à allure en zig zag, suite aux décrochements des blocs. La zone Ouest n'est pas affectée par ce décapage et les blocs détendus sont restés en place.

En rive droite, l'altération mécanique provoque le glissement sur les joints de stratification ou de schistosité principale, des dièdres découpés par ces joints et les grandes diaclases E-W, cisailés à l'amont par les grandes diaclases parallèles au fleuve. Dans le secteur au Sud des balises BAR 12-13, le décapage est total. Au Nord, il n'est que partiel: il subsiste des éperons déconsolidés dont le plus volumineux est situé entre les balises BAR 9 et BAR 14.

Altération chimique

L'altération chimique est due à la circulation des eaux dans les joints

et fissures plus ou moins ouverts par la détente du massif et le basculement vers le vide des versants. La topographie et l'altération mécanique jouent donc un rôle important.

En galerie et en sondages on a pu distinguer les horizons suivants:

- H0 terre végétale et éboulis
- H1 roches très altérées, presque complètement désagrégées et partiellement transformées en argile
- H2 roches altérées dans la masse mais conservant une certaine compacité, fractures remplies d'argile
- H3 roches compactes altérées dans les lits quartzitiques avec altération intense le long des joints et fractures
- H4 roches saines dans les lits quartzitiques, altération suivant les joints
- H5 roches saines, altération limitée à quelques fractures et failles.

En rive gauche, à l'Est de la ligne des balises BAR 7 -1-2, la zone altérée est très réduite, l'altération mécanique ayant éliminé les blocs.

L'horizon 1 varie de 0 à 1 m d'épaisseur : les horizons 2 et 3 n'existent que localement et sont peu épais. L'altération est limitée aux joints et fractures (horizons 4 et 5)

A l'Ouest de cette ligne, la partie inférieure du versant à topographie accusée est peu affectée, mais la partie supérieure principalement au-dessus de la cote 870, à topographie plus douce et subissant l'appel du vide (vers le Lualaba à l'Est et vers le ravin à l'Ouest) est fortement altérée.

En rive droite, la topographie accusée et la pente des bancs conforme à la pente du terrain limite la pénétration de l'eau en profondeur. L'altération chimique est pratiquement nulle, sauf dans la partie haute du versant où la pente est plus faible.

C - HYDROGEOLOGIE

Les roches du massif sont imperméables en petit.

L'eau circule dans les fissures et joints ouverts. Dans l'éperon de BAR 9, rive droite, on a mesuré 2 à 17 ul en moyenne avec des maxima dépassant 50 ul contre 0,5 ul en moyenne rive gauche avec des maxima inférieurs à 15 ul.

Sur la base de ces reconnaissances classiques, on pouvait donc conclure que ce massif fortement fracturé présente au site du barrage des conditions totalement différentes sur les deux rives. En rive gauche, en amont de la balise BAR 1, le versant est bien décapé, peu altéré et peu détendu sauf aux environs et en aval de la balise BAR 1.

En rive droite le massif est fortement détendu et déconsolidé sauf en amont des balises BAR 12 et BAR 13.

Quant au massif de la centrale, situé en profondeur, il n'est pas affecté par la détente ni l'altération, sauf aux lèvres des failles. Il est fortement fissuré par tous les réseaux de joints et recoupé par plus de 6 failles à remplissage argileux décimétriques.

Toutes ces informations méritaient d'être vérifiées, précisées et quantifiées. De plus, beaucoup d'informations étaient ponctuelles et des extrapolations en profondeur pouvaient être hasardeuses.

Il fut donc décidé de faire appel à des paramètres géophysiques et géomécaniques pour définir les caractéristiques des différents sites de barrage possibles en vue du choix de l'implantation optimum.

Ces mesures furent également réalisées dans la zone de la centrale pour vérifier l'homogénéité du massif et définir les caractéristiques géomécaniques.

III.- MESURES GEOPHYSIQUES ET GEOMECHANIQUES

A - PARAMETRES PHYSIQUES ADOPTES

Afin de répondre aux questions posées, il a été décidé de faire appel aux paramètres suivants :

- Géophysique

- vitesse longitudinale
- vitesse transversale
- module dynamique
- délai - (le délai est le temps mis par l'onde de choc pour parvenir de la couche rapide jusqu'au point de réception, il est donc lié à l'épaisseur de la zone altérée et décomprimée).

- Pressiométrie

Dans le domaine pseudo-élastique, l'essai de chargement permet d'obtenir un module aller E et l'essai de déchargement un module retour ER. le rapport $\frac{E}{ER}$ définit l'état de fracturation du rocher. En outre dans certains cas l'essai pressiométrique permet d'obtenir une limite inférieure de la pression de fluage et de la pression limite.

B - MESURES EFFECTUEES

Les mesures réalisées sur le terrain sont de deux types :

- mesures géophysiques

- la vitesse longitudinale a été mesurée :
 - sur des dispositifs classiques réalisées dans les galeries ou sur le site de barrage (22 dispositifs de 0 à 120 m)
 - à l'aide de tirs effectués par transparence à partir de galeries ou de l'extérieur (38 tirs)
- la vitesse transversale a été mesurée en galeries (18 dispositifs)
- le module dynamique a été calculé pour les galeries
- les mesures de délais ont été obtenues par des dispositifs brevetés CPGF, sur le site de barrage (208 points de mesure à la maille approximative de 10x10m)

- mesures pressiométriques

Les mesures pressiométriques comportent des cycles de chargement et déchargement pour des pressions variant de 30 à 60 bars (60 mesures sur 31 forages de 5 m de profondeur moyenne).

C - RESULTATS DES MESURES GEOPHYSIQUES

En galeries

- dispositifs classiques -

Les résultats obtenus en galeries sur des dispositifs classiques sont consignés dans le tableau suivant :

	V. longitudinale en m/s	V. transversale en m/s	module dynamique (bars)
CENTRALE			
Cote 770	4750 à 5400	2100 à 3150	310.000 - 630.000
Rive gauche			
Cote 770	4700 à 5400	3050	630.000
Cote 825	4200	2050 à 2250	230.000 - 360.000
Cote 877	3200 à 3500	1350 à 1950	130.000 - 250.000
Rive droite			
Cote 770	3650 à 5000	1600 à 2000	190.000 - 275.000
Cote 825	2550 à 3300	1550 à 1850	150.000 - 200.000
Cote 877	2000	1350	110.000 - 200.000

On remarquera que les paramètres mesurés :

- sont plus élevés en rive gauche qu'en rive droite
- décroissent avec l'altitude
- sont fortement influencés par l'état de fracturation du matériau. De plus des vitesses lentes apparaissent au droit de certains accidents.
- dépendent de l'épaisseur de la couverture qui conditionne l'état de contrainte (figure 2).
- Tirs par transparence -

Ces mesures étaient destinées essentiellement à l'étude de la centrale souterraine. Les vitesses longitudinales sont liées à l'anisotropie du matériau. Elles sont rapides (5400 m/s) dans le sens du pendage et de la schistosité (N.N.E. - S.S.W.) et plus lentes (4700 m/s) dans la direction perpendiculaire.

Ces mesures ont confirmé l'absence de zones à faible vitesse à l'intérieur du volume délimité par les galeries. On retiendra la possibilité de secteurs plus détendus au voisinage du Lualaba, et en quelques points particuliers.

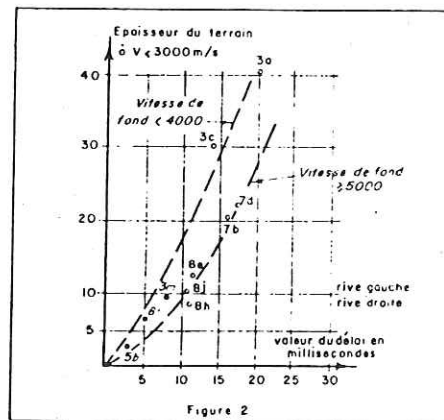
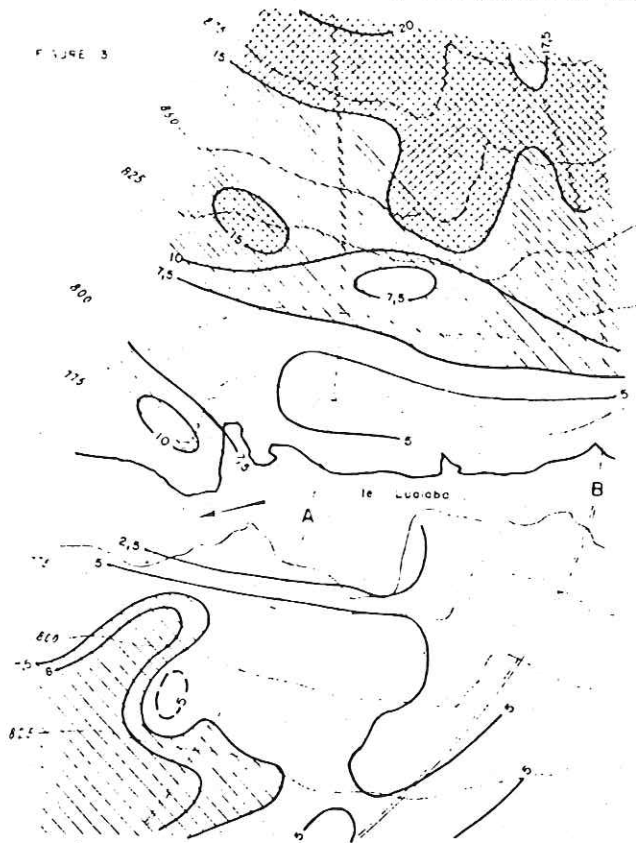


Figure 2

De surface

Les résultats des mesures de surface montrent une différence assez nette entre les deux rives, ainsi que le montre la carte des délais (figure 3).



Rive gauche : les valeurs rencontrées varient de 2 à 9 millisecondes avec une moyenne comprise entre 5 et 6.

Rive droite : Au pied des falaises, les valeurs sont relativement faibles (à 8 millisecondes), alors qu'au dessus, le délai varie entre 13 et 20 millisecondes.

Les vitesses longitudinales sont consignées dans le tableau suivant :

	vitesse superficielle (m/s)		vitesses intermédiaires (m/s)		vitesses de fond (m/s)	
Rive droite	Zone haute	300 à 700	1400 cote 900	sur 2200	sur 2000m/s	Cote 900
	> 780	sur 1 à 4m	1800 cote 860	5 à 20m	à 2600	10 à 30m
Rive gauche	Zone basse	1000 à 3000	1600 sur 0 à 3 m	1200 à 3200	sur 15000 à 5200	
	< 780	sur 0 à 3m		3200 sur 2 à 15 m	sur 4000	promontoire aval
Rive droite	Zone haute	500 à 1000	2400 à 2700	sur 5 à 15m	3800	Cote > 850
	> 780	sur 0,5 à 3m			5000	Cote < 850
Rive gauche	Zone basse	500 à 1400	2300	sur 0 à 6m	4750 à 5000	
	< 780	sur 0,5 à 2m5				

- les vitesses intermédiaires sont en général plus faibles dans les parties hautes que dans les parties basses, alors que l'épaisseur à attribuer à ces horizons croissent avec l'altitude.
- la vitesse de fond décroît quand l'altitude croît : 5000 m/s au niveau du fleuve, 3200 m/s (rive droite), 3800 m/s (rive gauche) vers la cote 850.

Les tirs par transparence ont confirmé les résultats fournis par la carte de délais et la présence de certains accidents sous le fleuve.

D - RESULTATS DES MESURES PRESSIOMETRIQUES

Modules pressiométriques

Les valeurs enregistrées varient pour le module aller de 2700 à 160.000 bars et pour le module retour, de 22.000 à plus de 200.000 bars.

D'une manière générale les valeurs sont plus élevées au fond des forages (4m50) qu'à la partie supérieure (2m50).

Le caractère ponctuel des mesures introduit une grande dispersion dans les résultats.

Le rapport $\frac{E}{E_k}$ est compris entre 0,5 et 0,3, correspondant à un matériau fracturé.

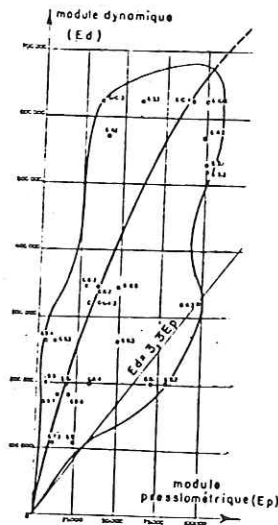


Figure 4

pressions limites

Dans l'ensemble, les pressions utilisées n'ont pas permis d'obtenir les pressions limites. Dans certaines zones broyées la pression limite pourrait être de 30 à 40 bars.

Commentaires

Malgré le caractère relativement ponctuel des mesures et des limites de l'appareillage pour les modules élevés les enseignements suivants peuvent être tirés:

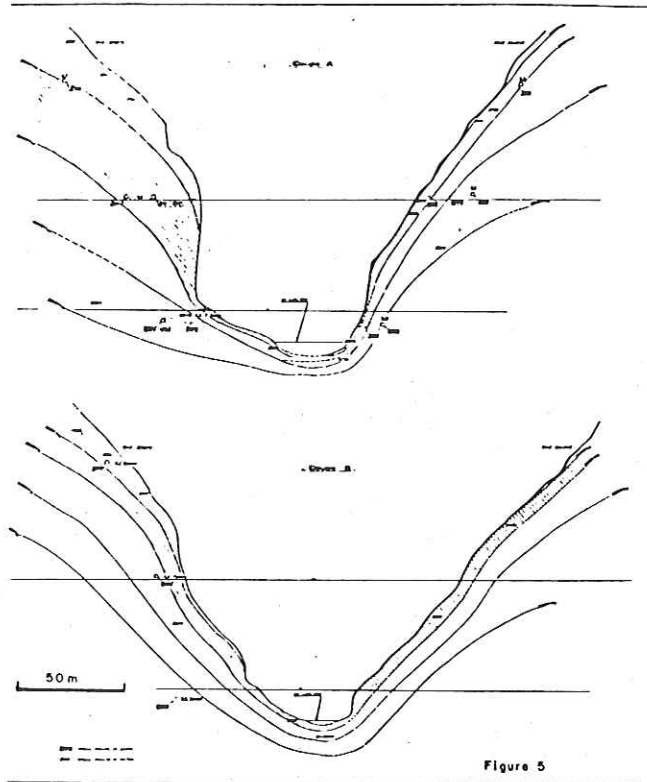
- les valeurs les plus faibles sont rencontrées en rive droite particulièrement aux cotes 825 et 877 et les valeurs les plus élevées en rive gauche à la cote 770
- il existe pour le site étudié la relation suivante entre le module dynamique et le module pressiométrique

$$E_{dyn} \approx 7 E \text{ bars}$$

ce qui est l'indice d'une fracturation importante. (voir figure 4).

IV - CORRELATION ENTRE LES MESURES ET LA GEOLOGIE - LIMITES ADOPTÉES

A l'aide des éléments fournis par les mesures géophysiques et les observations géologiques, il a été possible d'établir des coupes sismiques au droit de la zone étudiée (voir figure 5) et une corrélation entre vitesse longitudinale et nature du matériau.



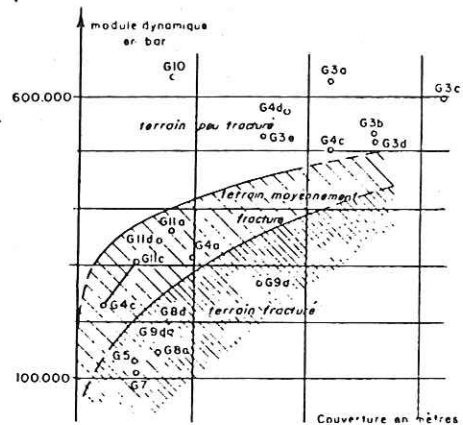
Horizon 0	200-700 m/s
Horizon 1	800-1000 m/s
Horizon 2	1200-1800 m/s
Horizon 3	2000-3000 m/s
Horizon 4	3000-4000 m/s
Horizon 5	4000-5000 m/s

- En vue de la comparaison des différents sites possibles on a adopté comme limite entre rocher très moyennement fracturé et rocher relativement sain, les valeurs suivantes :

- vitesses longitudinales : 3000 m/s
- module dynamique : 250.000 bars
- module pressiométrique : 25.000 bars

Ces limites peuvent être modulées en fonction de la couverture et de l'anisotropie.

- pour déterminer la cote du terrain à 3000 m/s, une corrélation entre délai et profondeur a été établie (figure 6).



Les différentes comparaisons entre les éléments géologiques et les paramètres mesurés sont résumés dans les tableaux ci-après

COTE < 780	RIVE GAUCHE		RIVE DROITE	
Observations géologiques	Zone d'érosion fluviale peu tectonisée	Zone d'érosion fluviale peu tectonisée	Bloc résiduel au pied de l'éperon - Bar 9 Très tectonisé	
Délai	< 5	< 7	≥ 10	
Profondeur 5000 m/s	< 6	< 15	> 25	
Module dynamique	630.000	275.000	185.000	
Module Pressiométrique	66.000	30.000	30.000	

COTE > 780	RIVE GAUCHE			RIVE DROITE		
	Amont Bar1	Eperon Bar1	Amont Bar13	Eperon Bar9	Bar 10	
Observations Géologiques	Versant décapé	En cours d'altération mécanique	Versant décapé par glissement	Eperon tectonisé et déformé solide	partielle décalé par glissement	
Délai	10	> 10	< 15	20	15	
Profondeur 3000 m/s	10 m	20-25 m	10m (cote825) 25m (cote880)	40-50 m	125 à 30 m	
Module dynamique	230.000 350.000	130.000	270.000	100.000 200.000	X	
Module pressiométrique (moyenne)	33.500	X	30.800	20.000	X	faillite ≤ 10.000

V.- CONCLUSION

Sur le site on a pu observer une bonne corrélation entre les observations géologiques et les mesures quantitatives effectuées. Ces dernières ont permis de définir l'état de fracturation et de détente du rocher, les volumes affectés (et partant un niveau de fondation possible). Les caractéristiques de plusieurs emplacements de barrage ont pu être précisés (avec une solution optimale en amont). Le site de la centrale s'est avéré favorable.

On remarquera à propos de l'exemple étudié, l'intérêt d'étalonner les mesures de surface par des mesures in situ, ainsi que celui du bloc sismique qui a pu être mis en oeuvre sur un site particulièrement tourmenté et qui en outre fournit un paramètre physique objectif, image de la fracturation et de la détente du rocher.