

## CLASSEMENT STATISTIQUE DE MESURES SISMIQUES ET CONCEPTION DE BARRAGES

Statistical classification of seismic measures and dam design  
Statistische Klassifizierung des seismischen Mass und Konzeption eines Staudamms

Y. BERTRAND, J. LAKSHMANAN et J. ROUGE

Ingénieurs Géologues E.N.S.G.  
Compagnie de Prospection Géophysique Française  
Rueil-Malmaison, France

### SUMMARY :

An objective analysis of seismic data on dam sites is exposed. The results have been statistically examined, comparing 89 dams founded on granite and schist. The comparison is based on depths of 1 500 and 3 000 m/s velocities, as well as on ultimate velocities. Two examples are described. In one case, we concluded that grouting was not necessary. In the second case, an earth dam was recommended rather than a concrete dam.

### RESUME :

En vue de mieux utiliser les mesures sismiques faites sur des sites de barrage, une méthode objective d'interprétation est exposée. Les résultats de 89 sites ont été traités statistiquement, permettant la comparaison des sites granitiques ou schisteux entre eux. La comparaison est basée sur les profondeurs auxquelles des vitesses de 1 500 et 3 000 m/s sont atteintes ainsi que sur la vitesse profonde. Deux applications sont décrites, où l'on a pu, par comparaison, donner dans un cas un pronostic sur l'inutilité d'injecter, et dans l'autre opter pour un barrage en terre.

### ZUSAMMENFASSUNG :

Um die seismischen Messen auf Dammlagen besser zu brauchen ist eine objektive Analyse vorgestellt. Ergebnisse sind geprüft worden die Granitlagen mit Schieferlagen vergleichen ; 89 Lagen sind so vergleicht worden. Die Vergleichen ist auf Tiefen mit Schnelligkeiten von 1 500 bis 3 000 M/S, so wie auf die tiefe Schnelligkeit gegründet. Zwei Beispiele werden beschrieben ; für einen Fall ist festgestellt, dass einspritzen nicht notwendig war ; für den andern Fall wurde ein Staudamm lieber als ein Betondamm empfohlen.

### 1. UTILITE D'UN CLASSEMENT DES RESULTATS SISMIQUES

Lors des études de faisabilité ou de pré-faisabilité de sites de barrage de faible à moyenne importance (7 à 25 m de hauteur), il est parfois nécessaire d'étudier plusieurs variantes avec des moyens matériels limités : géologie, sondages à la pelle, tranchées, sismique réfraction. Il n'est pas toujours possible de réaliser, à ce stade des études, des sondages carottés. Ceux-ci s'intègrent dans le cadre des études d'avant projet du site finalement retenu. L'Ingénieur Conseil peut être amené à démarrer la conception de l'ouvrage avec les éléments fragmentaires d'études précitées. En particulier, la réglementation française, dite "réforme de l'Ingénierie", peut contraindre l'Ingénieur Conseil à

avancer un "Coût d'Objectif" dans le cadre d'un concours pour l'attribution de l'étude d'Avant Projet Sommaire.

Pour tirer le maximum des prospections sismiques réalisées, il nous a paru utile de mettre au point :

- une méthodologie permettant de rendre plus objectives les interprétations sismiques, et rendre comparables entre elles des prospections réalisées par diverses firmes ;

- une comparaison statistique permettant de classer les ouvrages entre eux, sur la base des résultats sismiques.

En premier temps, le travail a été limité aux terrains granitiques gneissiques et schisteux anciens.

Nous devons garder à l'esprit que pour des sites

géologiquement "normaux", les aléas du sous-sol ne pèsent que de quelques pour cent, ou dizaine de pour cent, sur le coût de l'ouvrage, les paramètres hydrauliques et topographiques étant prépondérants.

Bien entendu, les vitesses sismiques ne sont qu'un élément géologique parmi beaucoup d'autres, et il est impossible de déterminer la cause d'une baisse de vitesse sismique (terrains compressibles, perméables, fracturés, etc...) sans autres données géologiques.

Finalement, le poids de nos critères sismiques est très faible dans l'ensemble des critères de choix du projeteur. Néanmoins, il nous a paru utile de qualifier les comparaisons sismiques entre sites, pour donner plus de valeur aux conclusions de prospecteur géophysicien.

La présente communication rend compte des premiers résultats d'un travail de recherche entrepris à la Compagnie de Prospection Géophysique Française, avec l'aide financière du gouvernement français (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique), et intitulé "Comparaison statistique sur barrages existants ou en projet entre mesures sismiques et propriétés mécaniques du granite".

## 2. ETABLISSEMENT D'UN PROCESSUS SYSTEMATIQUE DE DEPOUILLEMENT EN SISMIQUE REFRACTION

Les résultats d'une étude sismique conduisent à une coupe où les terrains sont regroupés en couches affectées d'une vitesse sismique fonction de l'altération. Les coupures suivantes sont généralement admises :

$G_0$  : Terrain superficiel, arène, roche totalement décompressée. La vitesse sismique longitudinale est faible. Elle est généralement comprise entre 300 à 600 m/s.

$G_1$  : Roche à éléments très altérés. Vitesse sismique de l'ordre de 1 000 - 1 500 m/s.

$G_2$  : Roche fissurée et légèrement altérée. Vitesse sismique comprise approximativement entre 1 500 et 4 000 m/s.

$G_4$  : Roche peu fissurée. Vitesse sismique supérieur à 4 000 m/s.

A partir de cette hypothèse de vitesses discrètes, il apparait nécessaire de déduire une variation continue des vitesses, et cela en tout point de la coupe d'interprétation des profils sismiques.

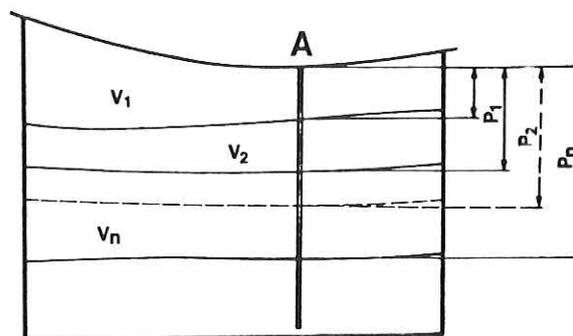
Pour cela, la méthode suivante se révèle la plus fructueuse (cf. figure 1).

Au point considéré, le terrain présente sur une ligne perpendiculaire à la topographie n terrains, de vitesses sismiques  $V_1, V_2 \dots V_n$ , rencontrés respectivement jusqu'aux profondeurs  $P_1, P_2 \dots P_n$ .

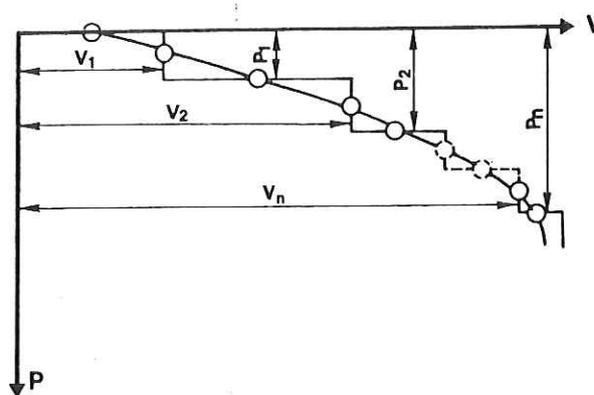
L'hypothèse des vitesses discrètes est représentée par une succession de segments joignant les points  $(0, V_1)$  ;  $(P_1, V_1)$  ;  $(P_1, V_2)$  ;  $(P_2, V_2)$  ; ...  $(P_{n-1}, V_n)$  ;  $(P_n, V_n)$ .

L'hypothèse de variation continue la plus défavora-

ble, c'est-à-dire celle où les vitesses croissent le plus lentement avec la profondeur, est celle où l'on établit une courbe reliant les points  $(P_1, V_1)$  ;  $(P_2, V_2)$  ...  $(P_n, V_n)$ . En revanche, l'hypothèse la plus favorable correspond à la courbe reliant les points  $(0, V_1)$  ;  $(P_1, V_2)$  ;  $(P_2, V_3)$  ...  $(P_{n-1}, V_n)$ .



COUPE AU POINT A D'UN PROFIL INTERPRETE CLASSIQUEMENT



COURBE DES VITESSES CROISSANT CONTINUEMENT  
Fig n°1

La courbe retenue, qui se révèle la plus intéressante pour la comparaison des sites, se situe entre ces deux hypothèses extrêmes. Elle relie les points suivants :  $(0, \frac{V_1}{2})$  ;  $(\frac{P_1}{2}, V_1)$  ;  $(P_1, \frac{V_2-V_1}{2})$  ;  $(\frac{P_2}{2}, V_2)$  ; etc...

Soit deux catégories de points  $(P_i, \frac{V_{i+1}-V_i}{2})$  et  $(\frac{P_i}{2}, V_i)$ .

Il s'avère que cette courbe varie assez peu lorsqu'on change les hypothèses d'interprétation classique.

Les coupes permettant le passage de l'hypothèse des vitesses discrètes à celle des vitesses variant continuellement avec la profondeur ont été dressées aux points suivants :

- fond de vallée,
- altitudes relatives par rapport au fond de vallée, en rive droite comme en rive gauche : 5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 80 m.

Ces coupes permettent de déterminer deux paramètres importants :

- Profondeur à laquelle une vitesse sismique longitudinale de 1 500 m/s est atteinte. Les roches présentant une vitesse inférieure à cette valeur sont généralement très fissurées, arénisées ou latéritisées.

- Profondeur à laquelle une vitesse sismique longitudinale de 3 000 m/s est atteinte. Au-delà de cette valeur, les roches sont généralement assez compactes.

Dans une première phase, les sites de barrages étudiés par la Compagnie de Prospection Géophysique Française ont été répertoriés. Cette reprise en archives a permis de définir les caractéristiques de barrage, les conditions mises en oeuvre pour l'étude considérée.

Ce travail a conduit à retenir 89 sites de barrages.

Pour chacun d'entre eux, il a été établi une fiche définissant les caractéristiques topographiques, les résultats paramétrés de l'étude sismique et un graphique précisant l'évolution de l'altération en fonction de l'altitude relative sur les deux rives.

### 3. PARAMETRES ETUDIÉS, NOTATION UTILISEE

Deux catégories de paramètres ont été étudiées :

- Vitesse de fond (il s'agit de la vitesse maximale observée pour la courbe considérée ; on constate généralement qu'il s'agit d'une valeur asymptotique).
- Paramètres de profondeur de l'altération, fournis par les coupes à altitude relative fixe. Pour ces derniers, la notation suivante sera retenue :  $P_X^Y$  désignera la profondeur en mètres où l'on atteint la vitesse sismique Y (m/s), à l'altitude relative X (m) par rapport au point le plus bas de la vallée.

#### 3.1 Vitesse de fond (cf. figure 2)

Des études statistiques portant sur des populations partielles de vitesses sismiques ont prouvé que les paramètres de la distribution n'étaient pas fonction de l'altitude relative. Ceci est tout à fait naturel, compte-tenu de ce que la variation de la vitesse de fond est liée à la tectonisation, qui peut être considérée comme statistiquement constante à l'échelle du site.

La vitesse de fond ne peut être qu'apparente dans le cas de dispositifs courts. Toutefois en première approximation l'étude des vitesses de fond a porté sur toute les valeurs relevées, pour les diverses altitudes relatives considérées.

Les données de l'étude statistique sont les suivantes :

- nombre de valeurs relevées : 565
- moyenne : 4 317 m/s
- écart type : 707,4 m/s
- tableau de la distribution expérimentale :

A	2100	2600	3100	3600	4100	4600	5100	5600	6100
B	4	21	58	139	151	98	74	20	
C	4	25	83	222	373	471	545	565	
D	0,708	4,42	14,7	39,3	66,0	83,4	94,5	100	

A : Limite de classe (m/s)

B : Effectif de la classe

C : Effectif cumulé jusqu'à la limite supérieure de la classe

D : Fréquence cumulée

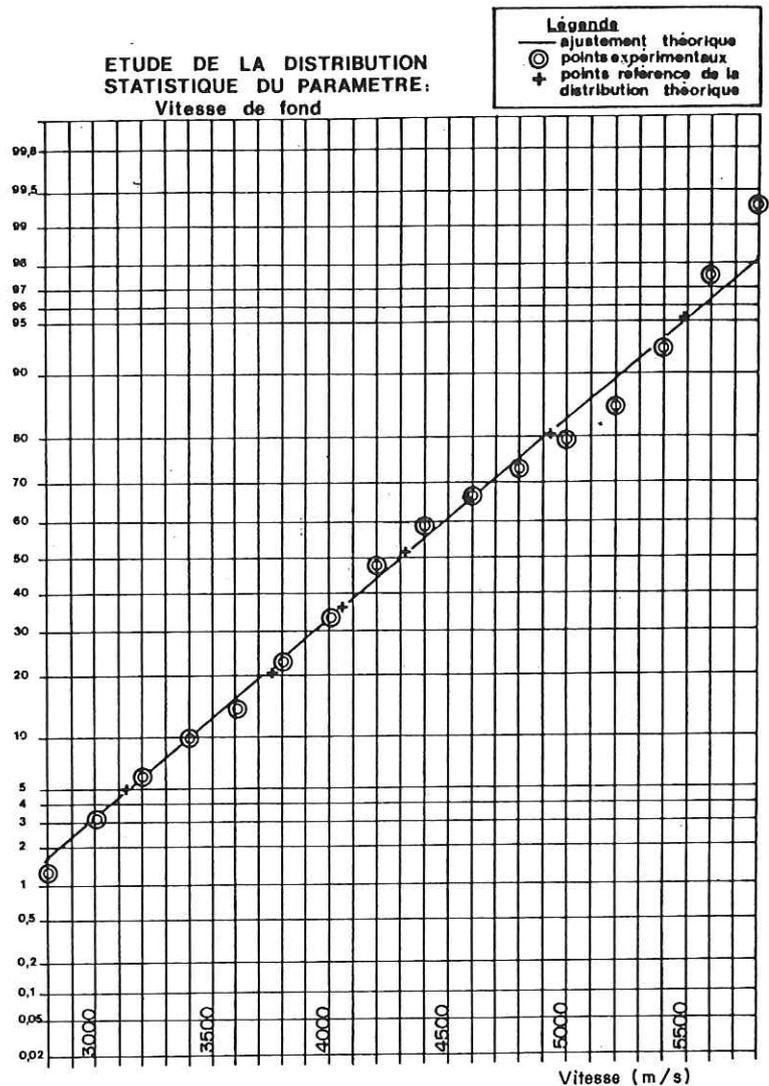


Fig : 2

La distribution expérimentale s'ajuste fort bien à une loi Normale. Ceci permet de définir une distribution théorique de tous les échantillons, à partir de la moyenne et l'écart type. Des repères sont relevés à l'aide de cette loi de répartition théorique, correspondant à des fréquences cumulées - références qui seront utilisées dans toute la suite. Ces fréquences sont les suivantes : 5 %, 20 %, 35 %, 50 %, 65 %, 80 %, 95 %.

Pour la vitesse de fond on retiendra les valeurs suivantes :

Fréquence cumulée (%) des valeurs inférieures à X	X (m/s) (valeur arrondie)
5	3 150
20	3 720
35	4 040
50	4 320
65	4 590
80	4 910
95	5 490

### 3.2 Autres paramètres

Un travail statistique semblable a été effectué pour les paramètres définis plus haut. Leurs valeurs expérimentales s'ajustent à des lois log Normales.

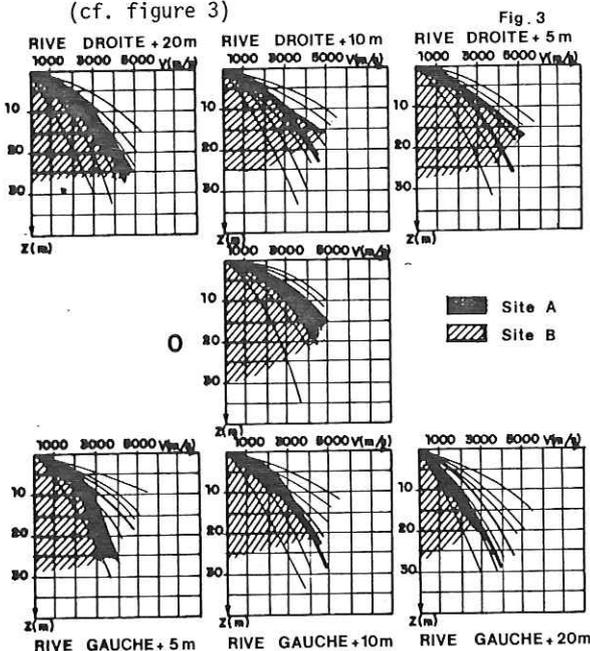
Nous ne donnerons ici que les valeurs médianes.

Altitude relative	Profondeur d'apparition (mètres)	
	1 500 m/s	3 000 m/s
Fond de vallée	2,0	6,3
+ 5 m	2,9	8,7
+ 10 m	3,8	10,6
+ 20 m	4,6	12,9
+ 40 m	5,2	16,4
+ 80 m	5,1 <sup>(1)</sup>	23,7 <sup>(1)</sup>

On voit nettement le phénomène classique d'épaississement de l'altération sur les rives.

### 3.3 Représentation synthétique des résultats

(cf. figure 3)



Un catalogue de courbes a été dressé en fonction des divers paramètres étudiés, auxquels a été jointe la vitesse de départ, soit  $\frac{V_0}{2}$ . Ce dernier paramètre suit une loi log Normale et est peu corrélé avec l'altitude relative, dès que celle-ci atteint 5 m, la valeur moyenne de  $V_0$  étant de 250 m/s environ.

Le catalogue groupe les courbes de réponse aux critères pour des vallées théoriques de référence symétriques. Pour chaque altitude relative, 7 courbes ont été définies. Celle où la croissance vitesse - profondeur est la plus rapide, limite la classe des 5 % des sites les plus favorables. La croissance vitesse - profondeur la plus lente limite la classe des 5 % des sites les plus défavorables. Six classes intermédiaires sont définies par les courbes, découpant la population

(1) Echantillon plus réduit

statistique de 15 % en 15 %.

Le catalogue permet de placer la réponse d'un barrage dans une distribution théorique infinie et de chiffrer l'évolution de la position statistique du site avec la profondeur.

## 4. CLASSEMENT DES SITES ENTRE EUX

### 4.1 Définition d'un indice objectif de classement

L'indice de classement est fondé sur la position statistique des divers paramètres. Ceci permet la comparaison de sites ne fournissant pas le même nombre de coupes vitesse - profondeur, du fait de leur topographie différente. Cette comparaison serait difficile avec un indice prenant en compte les valeurs des profondeurs, du fait de l'augmentation normale de ces paramètres avec l'altitude relative.

Après détermination de la position statistique de tous les paramètres concernant l'altitude relative  $X$ , en rive droite comme en rive gauche, une position statistique fictive  $F_x$  est donnée à la coupe considérée.  $F_x$  prend en compte, affectées chacune d'un coefficient de 1, les trois fréquences cumulées des valeurs inférieures à  $p_{1500}^x$ ,  $p_{3000}^x$ , ou supérieures à la vitesse de fond. Ceci donne une importance toute particulière à la vitesse de fond, puisque celle-ci intervient déjà dans les paramètres  $p_{1500}^x$  et  $p_{3000}^x$ .

Un premier "indice général",  $I_g$ , est déterminé par la moyenne arithmétique des valeurs  $F_x$  pour toutes les coupes réalisées sur le site.

Un deuxième indice,  $I_r$ , dit "indice de rive", est donné par la moyenne arithmétique des positions statistiques fictives des coupes réalisées sur la rive la plus altérée, soit la plus forte des deux moyennes,  $(\frac{\sum_0^n F_x}{n})$  rive gauche ou  $(\frac{\sum_0^n F_x}{n})$  rive droite.

Enfin, un troisième indice,  $I_p$ , dit "indice de point", est fourni par la plus grande des valeurs  $F_x$ .

L'indice de comparaison synthétique est égal à  $I_g + I_r + 1/2 I_p$ .

Il conduit à considérer comme meilleur, parmi deux barrages ayant le même indice général, celui qui a l'altération la plus faiblement hétérogène, statistiquement.

### 4.2 Résultats résumés

Le tableau concernant les 89 premiers sites étudiés se résume comme suit :

Sites étudiés	$I_g$	$I_r$	$I_p$	$I_g + I_r + 1/2 I_p$
A	4,5	5,7	15,7	7,2
B	45,8	47	50,3	47,2
C	50,5	55,4	63,8	55,1
D	56,2	60,3	80,7	62,7
E	92,6	93,0	95,0	93,2

A : Meilleur site

B : Un écart type (29ème site)

- C : Site médian (44 - 45ème sites)  
 D : Un écart type (60ème site)  
 E : Site le moins bon

## 5. APPLICATIONS PRATIQUES

### 5.1 Nécessité d'injections

Un cas récent nous a amené à utiliser notre classement. Au site A est projeté un barrage en terre de 20 m de hauteur ; on ne dispose pas de sondages carottés et d'essais Lugeon. Au site B, géologiquement semblable, et distant de quelques dizaines de kilomètres, un barrage en terre a été édifié. Il a nécessité d'importantes injections. Sans attendre les sondages prévus au site A, peut-on supposer qu'il faudra des injections ou non ?

Les résultats sismiques utilisés pour le classement sont les suivants :

		Rive gauche			Fond	Rive droite		
		+20m	+10m	+5m	0	+5m	+10m	+20m
I	A	3,0	3,4	2,6	1,5	3,0	4,5	4,0
	B	3,5	4,5	3,5	2,8	2,8	6,0	8,0
II	A	13,0	12,0	10,3	6,0	16,5	20,4	15,0
	B	10,5	7,8	7,0	10,2	8,2	13,0	15,0
III	A	4350	4350	4300	4300	4300	3400	3400
	B	4000	4000	4000	4000	3050	2900	2600

I : Profondeur 1 500 m/s

II : Profondeur 3 000 m/s

III : Vitesse de fond

Les indices pour les deux sites sont les suivants :

		Ig	Ir	Ip	Ig+Ir+1/2Ip
Site A	Arrêté à 10 m	61,9	70,0	81,0	69,0
	Jusqu'à 20 m	53,4	68,6	81,0	65,0
Site B	Arrêté à 10 m	63,9	70,7	80,3	69,9
	Jusqu'à 20 m	64,8	73,2	80,7	71,3

Il apparaît que les deux sites sont comparables dans la médiocrité, chacun ayant une rive droite mauvaise. Si on les intercale dans le classement des 89 sites ayant servi de départ, les 2 variantes du site A se situent aux environs des 62ème et 66ème places, celles du site B aux 68ème et 71ème places.

A moins de 5 m de profondeur, le site A est meilleur. Pour un barrage de 20 m de hauteur, le site A est légèrement meilleur.

Ces éléments ont permis à l'Ingénieur Conseil d'opter pour une hypothèse d'injections plus réduites en A.

### 5.2 Type d'ouvrage

Dans une autre région granitique française, un barrage de 13 m est projeté avec deux variantes C et D. A 12 km, un barrage voûté de même hauteur a récemment été édifié. Des problèmes ont été rencontrés lors des terrassements et leur profondeur atteint 7 m. Il s'agissait de comparer les trois sites. Les paramètres sismiques sont les suivants :

		Rive gauche		Fond	Rive droite	
		+ 10 m	+ 5 m	0	+ 5 m	+ 10 m
I	C	7,0	4,2	2,0	4,6	5,1
	D	5,6	3,0	1,9	4,2	3,7
	E	1,2	3,4	1,9	2,6	3,8
II	C	12,8	9,8	8,6	12,4	13,5
	D	12,4	11,6	7,7	10,7	9,5
	E	8,6	8,6	8,9	11,4	15,8
III	C	4000	4100	4600	4300	4200
	D	4650	4600	4800	4800	4800
	E	5700	5200	5900	5500	4400

I : Profondeur 1 500 m/s

II : Profondeur 3 000 m/s

III : Vitesse de fond

Ce qui donne les indices suivants :

	Indice général Ig	Indice de rive Ir	Indice de point Ip	Indice de comparaison synthétique
Site C	50,1	50,5	58,3	51,9
Site D	48,4	50,1	55,3	50,5
Site E	37,9	45,7	58,3	45,1

On en conclut que les sites C et D sont un peu moins favorables que le site E. Compte-tenu des quelques difficultés rencontrés au site E, un barrage en béton en C ou en D est à déconseiller, le meilleur des deux étant le site D.

Effectivement, compte-tenu de tous les autres éléments en possession du projeteur, le site D a été retenu en vue de la construction d'un barrage en terre. Les injections y seront probablement très limitées, voire supprimées.

### 5.3 Exemples de classements géotechniques de sites

Lorsqu'on est amené à faire un classement géotechniques de plusieurs sites dans une région déterminée afin de n'en retenir qu'un, les critères d'appréciation portent sur divers paramètres, dont la valeur (qualitative ou quantitative) permet d'estimer les difficultés de réalisation de telle ou telle partie de l'ouvrage. Le résultat de l'examen des paramètres sismiques permet de livrer au Maître d'Ouvrage une appréciation globale. Il

est alors intéressant de voir avec des exemples traités dans quelle mesure l'appréciation géotechnique correspond au classement des sites par l'indice de comparaison synthétique. Nous citons ci-après deux exemples.

Exemple 1 : Choix d'un site de 6 000 000 m<sup>3</sup>, de 10 à 20 m de haut, dans le Massif Armoricain.

Site	Classement par l'indice	Valeur de l'indice	Classement géotechnique général	
A	38	47,1	2	Site en cours de construction
B	45	50,6	3	
C	58	55,3	1	
D	70	65,0	5	Site rejeté
E	76	74,3	4	
F	81	78,6	6	Site rejeté

Exemple 2 : Choix d'un site de barrage de régularisation de 10 m de haut dans le Massif Armoricain.

Site	Classement par l'indice	Valeur de l'indice	Classement géotechnique général	
A	7	31,3	1	Les sites A, D et E sont dans la même zone : il s'agit en fait de 3 axes d'un même site
B	16	38,0	1	
C	17	38,1	4	
D	23	43,3	1	
E	25	44,7	1	
F	32	49,0	2	
G	64	66,0	3	
H	73	73,3	5	
I	80	78,0	7	
J	87	89,8	6	

Les sites seront très vraisemblablement (2 sites sont prévus) :

- le site B
- soit le site E topographiquement le meilleur entre A, D et E
- soit le site H à très forte capacité.

Ces deux exemples montrent qu'il y a en gros concordance entre l'appréciation géotechnique faite avant classement et le classement défini par le présent article. Les anomalies de détail s'expliquent aisément par l'incidence de critères qui n'interviennent pas dans l'indice de valeur (En particulier, la présence à proximité de matériaux d'emprunts est très souvent un élément déterminant de choix).

## 6. CONCLUSION

Le travail de recherche entrepris a permis d'affiner et de rendre plus objectif l'outil d'étude des sites de barrages que constitue la sismique réflexion. Par comparaisons statistiques, il a été

possible de préciser les pronostics géotechniques formulés avant sondages, particulièrement par comparaison avec des sites géologiquement et géographiquement proches. Il reste qu'il ne faut accorder à la géophysique qu'une valeur toute relative dans l'appréciation géotechnique d'un site de barrage, et garder à l'esprit que bien souvent les considérations topographiques et hydrauliques seront prépondérantes sur la géotechnique dans son ensemble.

Efin, il faut émettre la réserve suivante : la valeur des vitesses sismiques dépend non seulement de la fissuration du rocher mais également de ses caractéristiques minéralogiques et de structure. Un récent exemple vient de nous montrer qu'une zone de fracture dans les gneiss du socle africain correspondait à un rocher à vitesse de 4 200 - 4 500 m/s dans un ensemble ayant une vitesse de 5 400 à 5 900 m/s.

Cette dernière remarque indique la direction vers laquelle cette recherche devrait être développée : les sites devraient être classés à l'intérieur de groupes géologiques et géographiques, et la recherche étendue à l'étude de projets autres que les barrages de façon à disposer de données suffisantes à l'intérieur de chaque groupe.

-----  
Y. Bertrand, J. Lakshmanan et J. Rougé, Compagnie de Prospection Géophysique Française, 77 - 79 Avenue Victor Hugo, 92500 Rueil-Malmaison, France.