

ANALYSE STRUCTURALE D'UNE DIGUE EN ARGILE

Franck DEPLAGNE. Claude BACCONNET
Laboratoire de Génie Civil, C/U/S/T,
Université Blaise Pascal
63174 AUBIERE CEDEX

RESUME. Les barrages en terre réalisés à partir d'un matériau naturel, ont une structure artificielle due à la construction par couches régulières d'environ 30 cm. Ce mode de mise en œuvre très répétitif permet d'obtenir un ensemble homogène à l'échelle du barrage, très structuré verticalement et moins dans les directions horizontales. Pour retrouver la structure d'un tel ouvrage, deux campagnes de reconnaissance ont été faites avec un pénétromètre dynamique. Les structures définies par les variogrammes expérimentaux permettront de kriger sur l'ensemble de la coupe du barrage. Cette approche a pour but de localiser les points faibles et d'estimer leur étendue. Elle peut s'intégrer dans un processus de vérification de la stabilité des pentes.

ABSTRACT. Earth dams are built with natural materials. They show an artificial structure due to the construction process by different layers 30 cm thick. With such a process, the dam can be considered as a homogeneous medium at large scales even if it is very structured in the vertical direction and less in the horizontal directions. Two sampling campaigns have been made with a dynamic penetrometer to reveal the structure of such a facility. The variograms thus obtained are used to kriging a typical vertical area of the dam. This approach should be able to locate soft layers and estimate their dimensions, to provide calculations of mechanical stability.

1 INTRODUCTION

Les barrages ou digues sont érigés à l'aide des matériaux existant localement. Les caractéristiques de ceux-ci déterminent le dimensionnement de l'ouvrage ainsi que son type de construction (digue homogène, pseudo-zonée ou avec noyau). La majorité des ouvrages dont le volume de terrassement n'excède pas 150 à 300000 m³ sont constitués d'un seul matériau. De ce fait, ils sont considérés comme homogènes. Leur stabilité en cours de travaux est vérifiée sur la base d'essais de laboratoire et les calculs supposent l'homogénéité de l'ouvrage. Or l'existence d'une seule couche mal compactée située dans une zone critique comme le pied de bar-

rage, suffit à déclencher la rupture. Cette éventualité doit prévaloir lors de la conception et le contrôle de la mise en place des matériaux doit fournir les essais propres à identifier ces zones. Ces deux objectifs peuvent être abordés d'un point de vue géostatistique.

La variabilité spatiale du matériau mis en œuvre est à la fois présente dans les caractéristiques physiques (densité, teneur en eau) et dans les résistances mécaniques (résistance au cisaillement, rigidité, résistance à la pénétration dynamique). Cette variabilité trouve ses origines d'une part dans la variabilité naturelle de la zone d'emprunt et d'autre part dans le processus de fabrication par décapage. Les matériaux sont prélevés par bandes de 15 à 30 cm d'épaisseur et de quelques mètres de large ; ils sont ensuite redéposés en couches de 30 cm puis compactés.

Ces deux structures coexistent sans qu'il soit toujours possible de les séparer au préalable. Pour les matériaux peu variables constituant les petits barrages, le mode de mise en œuvre semble prépondérant ([1]). Pour les volumes plus importants des grands barrages, la variabilité de l'emprunt transparait le plus souvent à travers la chronologie de mise en place ([3] et [5]), masquant ainsi complètement la structure spatiale.

L'appréciation de l'homogénéité et le contrôle de la mise en œuvre s'effectuent traditionnellement sur une mesure locale de la densité en place et de la teneur en eau. En complément de ces mesures classiques, la résistance au pénétromètre dynamique, très facilement mesurable, a fait l'objet d'une campagne riche de 120 sondages offrant un ensemble d'environ 40000 points de mesure sur le barrage de La Ganne. Ce nombre important est avant tout lié à la résolution verticale de 5 mm. Ces essais rapides sont séduisants dans l'optique du contrôle et quantifient la résistance des couches traversées. D'autres essais complémentaires ont été réalisés à proximité immédiate des pénétromètres. Une étude statistique a montré une corrélation très forte entre la résistance de pointe et la résistance à la compression simple ([2]).

L'analyse des diagrammes de pénétration (Figure 2) montre l'extrême sensibilité de la méthode de mesure. Celle ci génère des pics locaux, liés à l'existence d'inclusions (fragments marno-calcaires), dont la valeur est peu représentative du matériau moyen. Leur présence est peu compatible avec l'hypothèse intrinsèque et génère une queue de distribution importante vers les valeurs fortes de l'histogramme, correctement traduite par une distribution log-normale (Figure 3).

2 ETUDE STRUCTURALE DES DONNEES BRUTES

L'étude du barrage a été menée à partir de trois ensembles de données distincts. Ils se décomposent en deux plans perpendiculaires et une coupe :

- un plan longitudinal, dans l'axe du barrage, reconnu par 50 sondages de 1.60 m de profondeur espacés de 2.50 m,
- un plan transversal reconnu par 38 sondages de 1.20 m de profondeur espacés de 0.75 m,
- une coupe du barrage le long du parement aval. Celle ci, composée de 27 sondages, a été effectuée à deux niveaux d'avancement différents

du chantier pour en avoir une reconnaissance sur toute la hauteur.

L'étude structurale a été conduite suivant les deux plans qui correspondent à une zone centrale de l'ouvrage. Les sondages de la coupe serviront de support pour le krigeage.

Les couches jugées représentatives du barrage sont choisies au delà de 55 cm pour l'axe transversal et au delà de 70 cm pour l'axe longitudinal, de façon à ne pas prendre en compte l'influence des variations climatiques de surface (gel, dessiccation). Le variogramme vertical et le variogramme horizontal des données brutes révèlent une structure à 40 cm dans la direction verticale et de 13 m dans la direction horizontale (Figures 4).

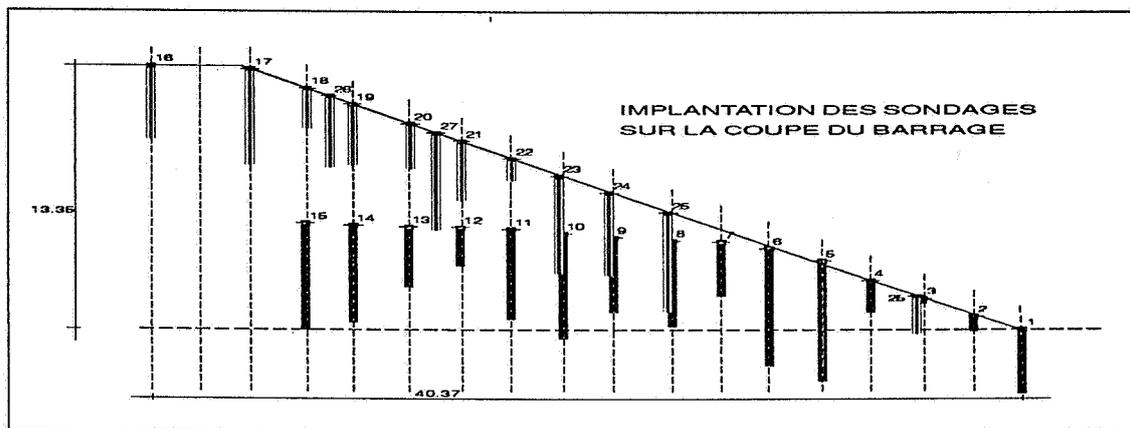


FIG 1 Implantation des sondages sur la coupe du barrage.

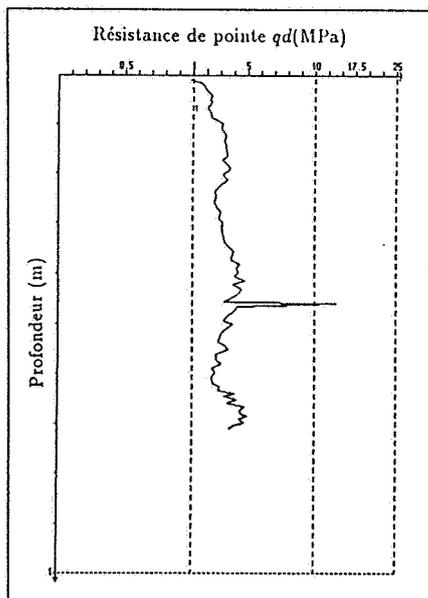


FIG 2 Pénétragramme type avec une structuration et une inclusion.

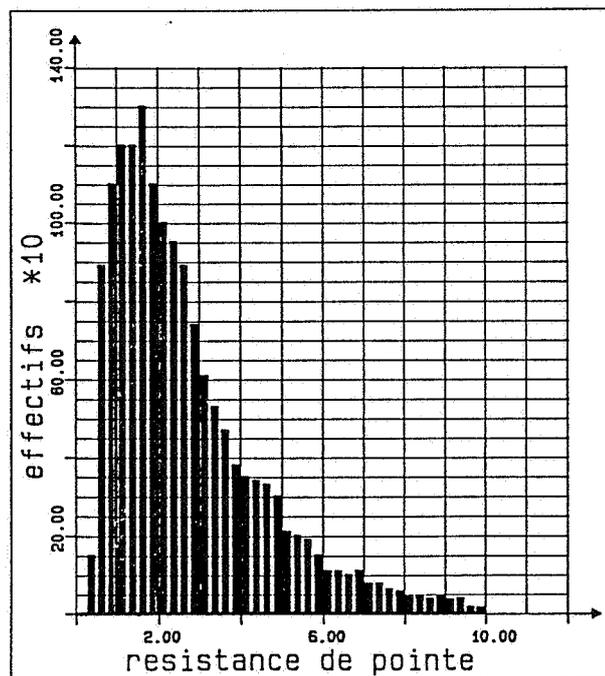


FIG 3 Histogramme des données brutes.

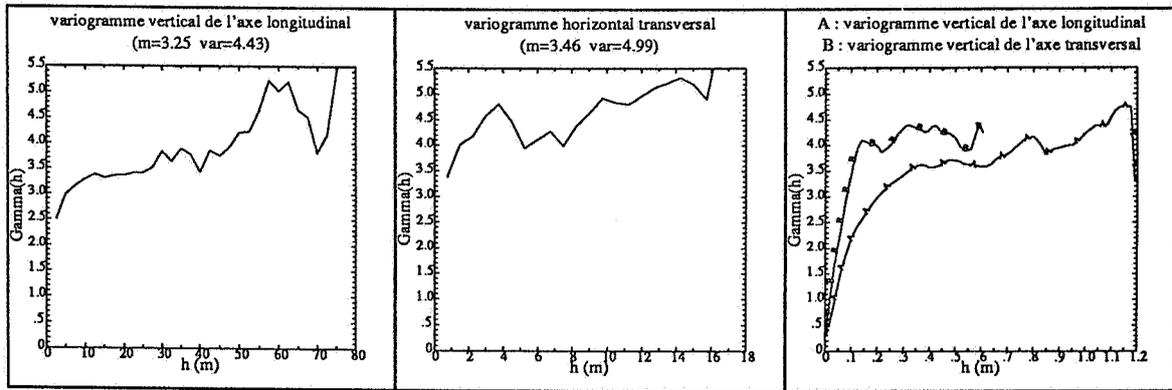


FIG 4 Variogrammes des données brutes.

Les variogrammes calculés avec les mesures de l'axe transversal révèlent une structure à 10 cm dans la direction verticale et une structure moins évidente dans la direction horizontale. Les variogrammes s'accompagnent de variances très fortes : les coefficients de variation calculés sur les valeurs brutes varient de 0,5 à 0,7.

La différence de comportement du variogramme vertical entre les données du plan longitudinal et du plan transversal peut être expliquée par le fait que les mesures de l'axe transversal comportent plus de pics pouvant introduire une structure parasite.

3 ETUDE DES TRANSFORMEES LOGARITHMIQUES

Le traitement logarithmique ramène la distribution log-normale des mesures à une distribution normale. Les variogrammes verticaux calculés dans les deux plans, montrent des comportements semblables, qu'un modèle gigogne peut représenter avec des portées de 0.15 m et 0.65 m. Si la première fait écho aux profondeurs de pétrissage atteintes par les matériels de compactage, la seconde, moins évidente à identifier, est vraisemblablement liée à la présence des pics. Par ailleurs, si un modèle stationnaire traduit bien la structure longitudinale, le variogramme transversal est beaucoup plus difficile à modéliser (l'expression 1 décrit le modèle sphérique choisi).

$$\gamma(h) = 0.14 \times \gamma_{isotrope}(|\lambda(h)|) + 0.14 \times \gamma_{isotrope}(|A(h)|) \quad (1)$$

avec $h = (h_x, h_y, h_z)$, $|h| = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2}$, $\gamma_{isotrope} = \left(\frac{3}{2} |h| - \frac{1}{2} |h|^3\right) \mathbf{1}_{|h| < 1}$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \frac{1}{23.0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4.00} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.65} \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} \frac{1}{0.15} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.15} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.15} \end{pmatrix}$$

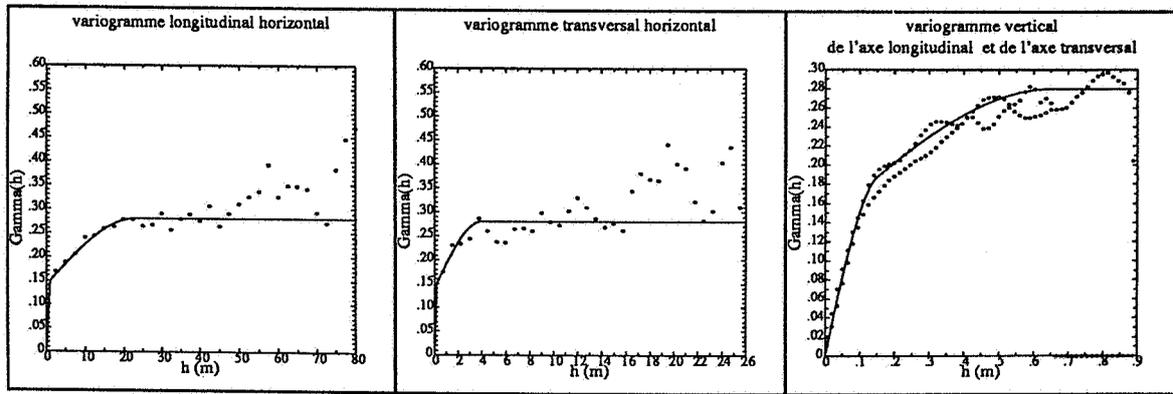


FIG 5 Modèles numériques des variogrammes (expression 1) pour une modélisation tridirectionnelle (données logarithmiques).

4 ETUDE DES DONNEES ECRETEES

Afin d'éliminer les pics locaux dus à des inclusions non représentatives de l'argile, un écrêtage des données brutes est réalisé suivant le schéma de la figure 6. Un signal moyen, obtenu par lissage du signal brut sur une fenêtre L_2 , représentatif des variations inter-couches, est enlevé au signal lissé avec une fenêtre plus petite L_1 . Le calcul de l'écart type des résidus (σ_{res}) ainsi obtenus permet de tracer un fuseau autour de la courbe lissée avec L_2 en prenant $R_2 \pm \alpha\sigma_{res}$. Les points du signal brut dont les valeurs sont situées en dehors de ce fuseau seront supprimées du fichier.

La structure révélée par les variogrammes des données brutes, écrêtées selon le principe décrit ci avant, semble plus représentative de la mise en place des matériaux. La portée verticale de 0.15 m est la seule conservée. Les portées horizontales délimitent la surface moyenne de dépôt des matériaux par les "scrapers" soit 15 m x 5.0 m. Pour les besoins du krigeage sur la coupe, un modèle sphérique a été retenu :

$$\gamma(|h|) = 0.03 + 0.39 \times \gamma_{isotrope}(|\lambda(h)|) \quad (2)$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \frac{1}{15.0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{5.00} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.18} \end{pmatrix}$$

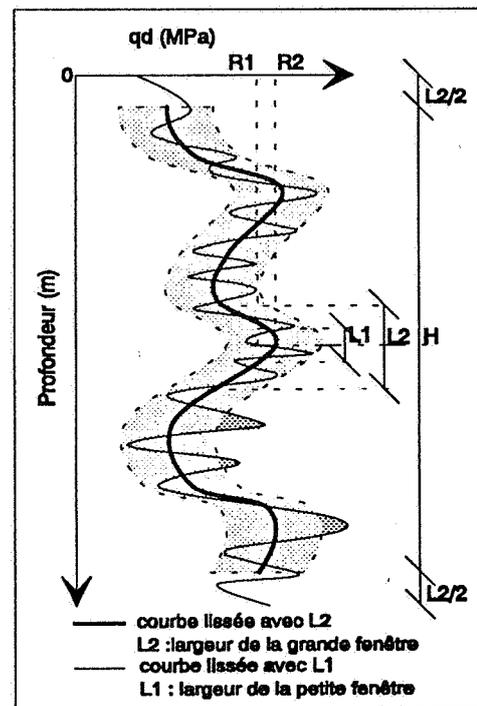


FIG 6 Schéma d'écrêtage.

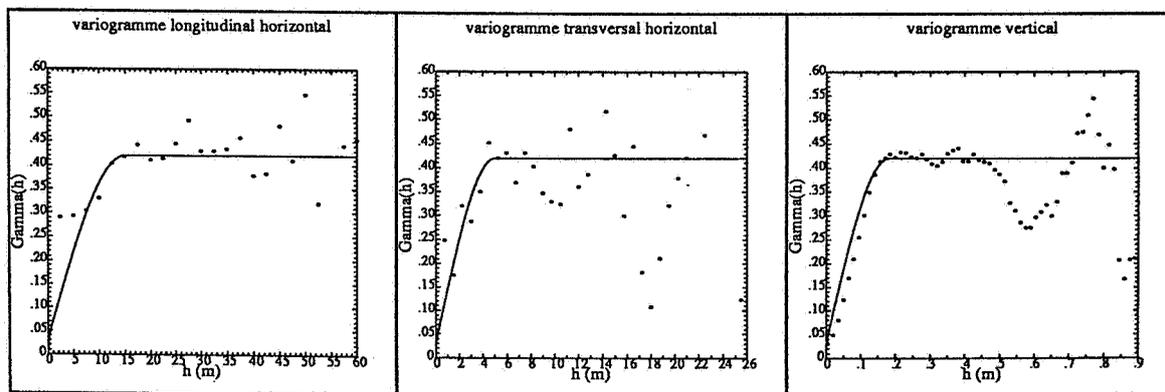


FIG 7 Modèles numériques des variogrammes (expression 2) pour une modélisation tridirectionnelle (données écrêtées).

5 KRIGEAGE DE LA COUPE

Les données situées sur la coupe présentent des paramètres statistiques différents des données précédentes (Tableau 8). Pour recalculer les variogrammes trouvés dans la campagne systématique, on applique un coefficient correcteur sur les valeurs des paliers, modélisés dans le paragraphe 4. Nous supposons que les modèles se correspondent par un effet proportionnel en m^2 .

Sur la carte de krigeage ponctuel ainsi obtenue, la stratification verticale apparaît nettement. Les zones de valeurs faibles prennent la forme de bancs horizontaux dont on peut juger l'étendue horizontale. On observe, dans la zone critique du pied de barrage, une succession de poches dont l'étendue correspond à la portée transversale mesurée. Elles définissent une ligne de rupture potentielle dans ce plan (Figure 9).

Sous l'hypothèse d'une répartition gaussienne des erreurs de krigeage, le quantile associé à chaque point krigeé et correspondant à une probabilité donnée p , est cartographiée. On estime ainsi beaucoup mieux les zones sur lesquelles le paramètre mesuré a la probabilité p d'être inférieure ou égale à une valeur jugée critique. Sur la figure 10, la zone critique du pied de barrage apparaît nettement comme une succession de poches de moindre résistance.

TAB 8 paramètres de distribution.

Données Axe	brutes		écrêtées		logarithmiques	
	m	var	m	var	m	var
transversal	3.37	4.85	2.14	0.41	1.09	0.29
longitudinal	3.60	4.43	2.20	0.42	1.14	0.29
Coupe	4.60	9.98	3.07	1.16	1.34	0.34

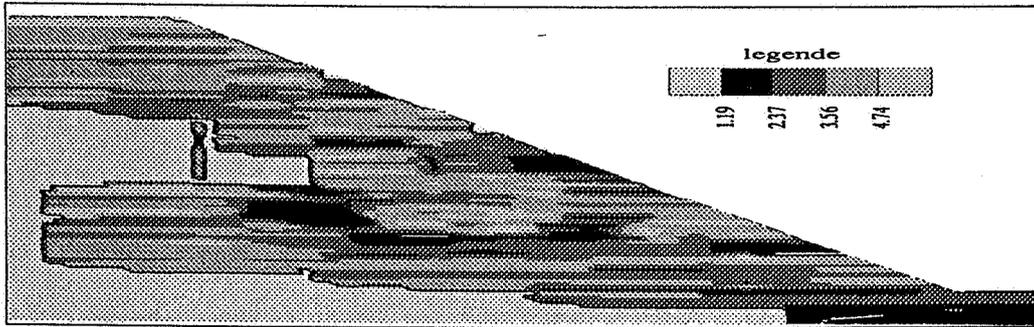


FIG 9 Coupe de la résistance de pointe en MPa.

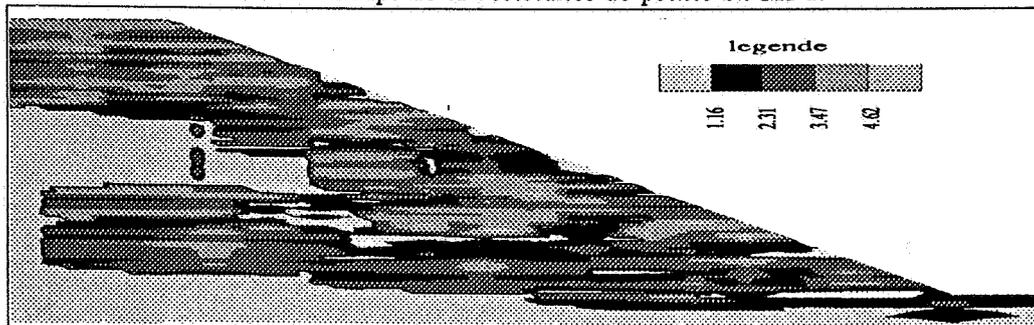


FIG 10 Coupe de la résistance de pointe moins un écart type d'estimation en MPa.

6 CONCLUSION

La sensibilité du pénétromètre aux caractéristiques mécaniques extrêmes du sol, permet d'apprécier la validité de l'hypothèse d'homogénéité que l'on prête volontiers aux matériaux des petits barrages. Un traitement des mesures est néanmoins nécessaire pour amoindrir les pics de forte résistance non représentatifs de la matrice argileuse et trop locaux pour influencer la stabilité globale de l'ouvrage.

Les variogrammes traduisent la structure stationnaire des données échantillonnées, par bancs subhorizontaux. Elle est en étroite relation avec le mode de construction. L'étude a montré, sur l'exemple de la coupe, qu'il était possible de mettre en évidence des zones de moindre résistance. Leur géométrie ainsi que leur position dans les parties critiques de l'ouvrage les rendent propices au développement de surfaces de rupture.

Les portées horizontales jouent un rôle déterminant dans l'estimation de la fiabilité de la pente. Elles calibrent la taille des zones critiques, tant pour un calcul bi-dimensionnel que tri-dimensionnel de la stabilité. Le processus de rupture très influencé par le modèle mécanique ainsi que par l'identification des paramètres ne devra plus négliger la variabilité spatiale. La fiabilité reste néanmoins très conditionnée par l'existence d'une seule couche de faibles caractéristiques.

La promotion des essais pénétrométriques dans le cadre d'un contrôle renforcé, doit permettre, par leur pouvoir de résolution, la mise en évidence de zones faibles où la géostatistique traduira leur continuité géométrique. Les modèles de variabilité et notamment les portées horizontales pourront servir de base à la définition des programmes d'essais en vue du contrôle.

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] **BACCONNET C, DEPLAGNE F, GOURVES R** – Collecte et traitement de données pénétrométriques sur une digue en argile. *Colloque Géotechnique et Informatique, ENPC, Paris 1992, 7p.*
- [2] **DEPLAGNE F, BACCONNET C, ROYET P** – Apport du pénétromètre dynamique léger au contrôle de compactage des barrages en terre. *Colloque technique sur les petits barrages, CFGB-AFEID, Bordeaux 1993, communication n° 24, 14p.*
- [3] **FAVRE JL, BEKKOUCHE A** – Analyse de la fiabilité des barrages en terre. *Revue Française de Géotechnique N° 53, Oct. 1990, pp. 45-54.*
- [4] **FRY JJ, ROSSA O** – Approche probabiliste de la sécurité des remblais homogènes. *Rapport EDF, 30 p.*
- [5] **SOULIE M, FAVRE M, KONRAD JM** – Analyse géostatistique d'un noyau de barrage tel que construit. *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, 1983, pp. 453-467.*