

Utilisation d'une méthode de reconnaissance géotechnique à rendement élevé sur l'aménagement de Vallabrègues

Laurence Duchesne ^a, Jean-Jacques Fry ^b et Nicolas Racana ^c

Dans le souci d'assurer un risque minimum à la population, les concessionnaires de digues ont développé depuis une cinquantaine d'années des programmes de surveillance préventive. Ceux-ci reposent essentiellement sur des visites régulières des ouvrages en service. Au cours de ces visites, les inspecteurs font une observation visuelle de l'état des digues (état de surface, présence de végétation, d'animaux fouisseurs...) et effectuent un relevé de mesures à l'aide d'équipements d'auscultation de l'ouvrage.

Suite à ces inspections, une décision d'engager ou non une campagne plus approfondie est alors prise par le concessionnaire sur les sections douteuses. Celle-ci se traduit le plus souvent par des essais de reconnaissance géophysiques d'abord et géotechniques ensuite. Parmi ces derniers, les plus courants sont les sondages pénétrométriques (statiques ou dynamiques), pressiométriques, carottages, essais de laboratoire (identification de sol, essais triaxiaux...).

La difficulté souvent rencontrée dans le choix et l'interprétation de ces campagnes est double. Comment caractériser la résistance à l'érosion interne d'une part et la résistance dynamique d'autre part ? Une réponse unique et codifiée est souhaitable, mais n'est pas connue à l'heure actuelle.

Afin de développer une nouvelle méthode visant à intégrer tant l'aspect technique précédent que l'aspect économique et pratique (mobilité du matériel, rapidité d'utilisation et coût) que

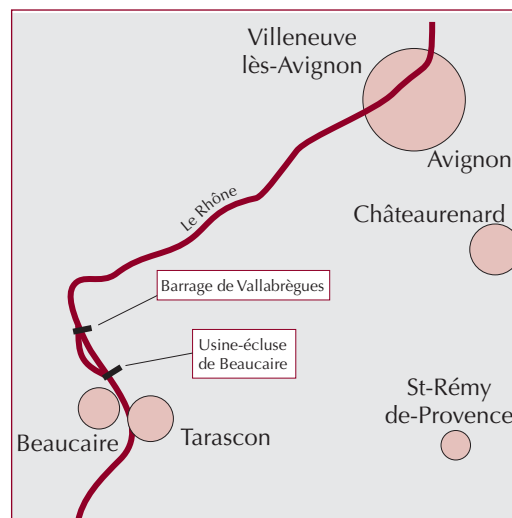


Figure 1 – Plan de situation de l'aménagement de Vallabrègues.

technique, un groupe de travail orchestré par la CNR et regroupant EDF-CIH, Sol Solution et le LGC CUST s'est mis en place. La méthode est basée sur la caractérisation des alluvions fines par le pénétromètre léger Panda.

Le cadre d'intervention et l'application à un site et à une étude particulière

L'usine de Vallabrègues et les digues attenantes sont situées dans le delta du Rhône (figure 1). Les digues ont été étudiées dans les années 60 et réalisées de 1967 à 1969. Elles sont fondées sur les alluvions récentes, dans une zone où la sis-

Les contacts

- a. Compagnie Nationale du Rhône, Direction de l'Ingénierie Technique, Département Génie civil et Environnement, 2, rue André Bonin, 69316 Lyon Cedex 4
- b. EDF-CIH, Savoie Technolac, 73373 Le Bourget-du-Lac
- c. Sol Solution, ZAC des Portes de Riom, 63200 Riom

micité historique est importante. La CNR a désiré ré-analyser la stabilité des digues de cette chute en employant les méthodes récentes d'analyse sismique. L'étude a été confiée à EDF-CIH qui a développé la méthodologie d'évaluation de la stabilité dynamique des barrages depuis 1986, dans le cadre du groupe de travail « risques sismiques » du ministère de l'Industrie.

L'étude remise en 1997 préconisait de reconnaître l'existence et l'étendue de zones de moindres résistances sur des longueurs importantes. Après analyse des différentes méthodes, une campagne de reconnaissance géotechnique à base d'un matériel de type Panda a été réalisée en 1999 et 2000.

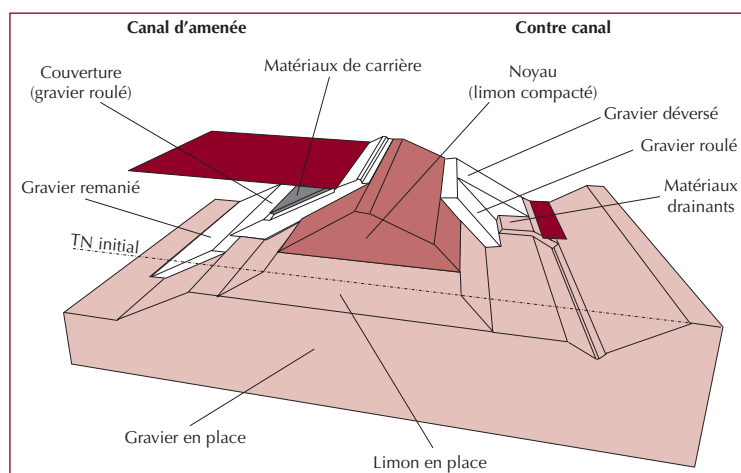
Le cadre de la reconnaissance par Panda

Description du site

L'aménagement de Vallabrègues est situé dans le delta du Rhône à mi-distance entre Avignon et Beaucaire. La mise en eau s'est terminée en janvier 1970. Les digues de Vallabrègues ont une hauteur moyenne de 10 m et un linéaire global de 20 km par rive. L'étanchéité est assurée soit par un noyau en limon en place rechargé, soit par des limons compactés. La stabilité est assurée par une recharge amont en alluvions grossières et une recharge aval constituée des mêmes matériaux (figure 2).

Les digues sont fondées sur des sédiments. Les sédiments proviennent d'une succession de sédimentations fluviales et marines pendant le tertiaire et le quaternaire. Les sédiments les plus

▼ Figure 2 – Coupe type d'une digue.



récents ont été apportés alternativement par le Rhône et la Durance. Les sédiments tertiaires se terminent par une couche d'argile indurée dont le toit est compris entre - 25 NGF et - 15 NGF. Au-dessus de ce substratum tertiaire, les alluvions du quaternaire sont composées de deux couches distinctes :

- une épaisseur de 20 à 25 m d'alluvions graveleuses ;
- une couche d'alluvions fines d'épaisseur variant entre 2 et 12 m.

Les alluvions fines ne sont pas homogènes. Elles vont du sable pollué à l'argile limoneuse, avec un pourcentage de fines passant de 0 à 100 % et un IP de 0 à 11. Dans la suite de l'exposé, seule la caractérisation de ces alluvions fines est développée.

Contexte de l'étude

L'étude s'insère dans une logique de niveaux de décisions, intégrant une phase préliminaire et une étude préalable. La phase préliminaire se situe à l'échelle du patrimoine des digues. Le gestionnaire du patrimoine, par la connaissance de son parc (conception, historique, surveillance), détermine les zones singulières et engage une procédure de diagnostic.

L'étude préalable a comme objectif de déterminer la faisabilité du diagnostic. Dans le cas de sections « à diagnostiquer » par notre méthode, deux aspects sont à étudier : l'aspect hydraulique (érosion interne) et l'aspect mécanique (résistance au séisme).

Les digues de l'aménagement de Vallabrègues faisant l'objet de l'étude ont déjà bénéficié de la phase préliminaire et de l'étude préalable dans le dispositif de surveillance mis en place par la Compagnie nationale du Rhône.

Lors de la phase d'étude CIH, l'analyse mécanique zonale est réalisée par pénétromètre SPT (*standard penetration test*). Certains sondages SPT détectent des zones très faibles au niveau des limons de fondation. Compte tenu du caractère discontinu du sondage SPT et de la taille de la maille de la campagne préalable, l'étendue de ces zones n'est pas connue et leur répercussion sur la stabilité post-sismique est à préciser. Il existe une suspicion que les zones les plus faibles soient des zones déstructurées par l'érosion interne.

La reconnaissance complémentaire nécessite un outil dont les fonctions sont :

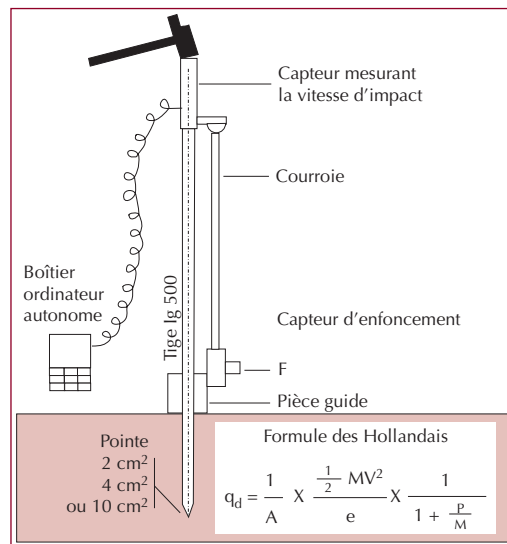
- localisation et quantification des zones de faiblesse ;
- diagnostic de la cause de faiblesse : manque de compactage, nappe, érosion interne, etc. ;
- caractérisation des paramètres enregistrés comme données d'entrées à l'étude sismique, adaptée au sol à reconnaître (limons) ;
- grande mobilité ;
- haut rendement ;
- économique.

Le pénétromètre apparaît l'outil le mieux adapté (Fry et Delage, 1993). Cependant, il n'est pas possible d'utiliser n'importe quel appareil. Par exemple, le stato-dynamique, conseillé dans les graves, est insuffisamment précis dans les limons. Des décalages de zéro ont ainsi conduit à l'abandon de pénétoigrammes sur d'autres sites. Le choix s'est porté sur le pénétromètre léger Panda mis au point par le LGC CUST (figure 3).

Les objectifs de la campagne de pénétromètres

La constitution d'un groupe de travail était nécessaire, car les objectifs étaient ambitieux voire innovants :

- vérifier l'étendue des zones où les résistances sont jugées critiques ;
- établir la cause de la faiblesse de ces résistances critiques ;
- établir des corrélations de résistances entre essais *in situ* sur ce tronçon ;
- appliquer les critères de liquéfaction établis sur le plan international avec le pénétromètre CPT (*cone penetrometer test*) ;



◀ Figure 3
– Pénétromètre dynamique léger Panda (d'après document Sol Solution).

– adapter au Panda la méthode de caractérisation de la liquéfaction du CPT, en remplaçant la mesure du frottement latéral par celle de la perméabilité ;

– conclure sur le risque de rupture de la zone étudiée.

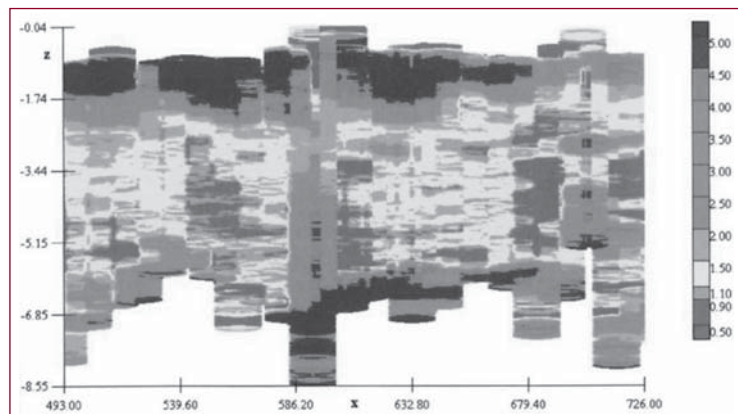
L'intérêt de la méthode

Les corrélations existantes entre les résultats de sondages mécaniques et les données d'un calcul sismique (potentiel de liquéfaction, résistance résiduelle), sont historiquement liées à l'utilisation du SPT (pénétromètre américain). Cependant la fiabilité du CPT incite les bureaux d'études à l'adopter pour leurs études dynamiques. Enfin, les avantages du Panda sont les suivants (tableau 1).

Le Panda est un outil de reconnaissance « manuel » donc facilement déplaçable, Les cadences de réalisation sont importantes dans le limon : l'utilisation du Panda permet de reconnaître 200 m environ de digue en limon en une journée avec une profondeur moyenne de 7 m de profondeur.

Critères	Comparaison des tests	
	SPT	Panda
Type de pénétromètre	SPT	Panda
Nombre d'essais	Grand	Très grand
Qualité de la mesure	Faible à bonne	Très bonne
Détection de variabilité	Moyenne à bonne	Très bonne
Domaine d'application	Non graveleux	Non graveleux
Prélèvement d'échantillon	Oui	Non

◀ Tableau 1
– Comparaison SPT-Panda.



▲ Figure 4 – Carte des résistances de pointe (Lepetit, 2002).

La présence d'une protection de surface en grave compactée implique la réalisation d'un avant-trou. Les techniques d'avant-trou, par ordre de coût, sont :

- battage et enfoncement d'une pointe spéciale de 10 cm² (55 euro/U) ;
- pré-forage à la moto-tarière (75 euro/U) ;
- excavation au tracto-pelle (125 euro/U) ;
- excavation manuelle (140 euro/U).

L'inconvénient du Panda est l'absence de mesure de frottement latéral nécessaire à la classification du sol. Pour y remédier, des prélèvements ponctuels sont faits. En plus, dans cette étude, une classification à partir de mesure de perméabilité à travers les tiges du Panda a été développée et testée.

Le contenu de la campagne d'essais

Une série de 24 essais pénétrométriques au niveau de la piste de risberme sur une profondeur de 7 m en moyenne est réalisée sur une des zones les plus faibles repérées par les SPT, s'étendant sur 230 m.

La section transversale de la crête à la risberme est aussi analysée, d'une part, pour vérifier l'évolution des résistances vers l'aval et, d'autre part, pour comparer les valeurs en crête avec les SPT.

Quatre autres zones, dont deux sections faibles à diagnostiquer et deux sections normales, sont étudiées avec un pas de 40 m pour les essais Panda. Les sections faibles présentent dans le passé des désordres d'érosion interne.

Un prélèvement important est effectué à côté du contre-canal d'une section jugée homogène d'après les résultats du Panda. Une analyse en laboratoire sur ce matériau détermine ses propriétés statiques et dynamiques sur cette section.

Résultats

Étendue des zones faibles

Une cartographie des résistances de pointe est établie par Krigeage à partir de ces mesures lissées avec un pas vertical de 5 cm et un pas de 10 m horizontal (figure 4). L'analyse géostatistique montre que le variogramme est plat entre 10 et 130 m. La portée des zones homogènes est de l'ordre de la dizaine de mètres. Le pas horizontal des essais futurs est porté à 40 m. Les résistances inférieures à 0,5 Mpa, et jugées critiques, sont très rares.

Causes des zones de faiblesses

Les résistances critiques, inférieures à 0,5 Mpa, sont concentrées au PK 255,7 entre 9,5 et 11,5 NGF (figure 5). La teneur en eau de cette zone est très élevée (29,6 à 30,1 %). Le limon à cet endroit est argileux : $1,75 < VB < 1,91$ avec 90 % de fines.

Cette zone est classée depuis 1992 comme zone d'érosion interne. À cette date, un fontis sur la risberme est apparu. Une étanchéité amont a été mise en place qui a stoppé l'écoulement souterrain.

Le Panda a repéré les zones décomprimées par le fontis. L'étendue horizontale de cette zone décomprimée reste confinée à une échelle métrique, puisque ce faciès n'est pas retrouvé sur les deux sondages adjacents (+/- 10 m).

À propos de la figure 5, d'une manière générale, il n'est pas possible de dire que les sections sujettes à l'érosion interne soient significativement plus faibles sur une échelle décimétrique. Les deux zones sujettes à l'érosion interne n'ont pas un coefficient de sécurité global statique ou dynamique inférieur à celui des deux zones sans problème. Donc, le Panda confirme que les passages d'érosion interne sont préférentiels et très localisés.

Établissement de corrélations

Le limon prélevé appartient à la classe GTR A1. Ce limon a entre 75 à 90 % de fines et 20 à 30 % de particules inférieures à 2 microns. Les limites d'Atterberg sont WL = 26, WP = 23, IP = 3. La valeur de bleu de méthylène VBS est 1,2. L'optimum proctor normal a une teneur en eau de 14,3 % et un poids spécifique sec de 18,1 kN/m³, le poids spécifique des grains est 26,6 kN/m³. Il a une cohésion nulle et un angle de frottement de 36°.

CORRÉLATION : RÉSISTANCE DE POINTE-COHÉSION NON DRAINÉE

Le diagnostic de la stabilité à court terme peut être traité avec la cohésion non drainée c_u obtenue à l'aide du Panda, en reliant le terme de pointe statique q_c ou dynamique q_d à c_u à partir de la relation empirique (Deplagne, 1994) :

$$q_c \approx q_d \approx 18.c_u$$

CORRÉLATION : RÉSISTANCE DE POINTE – TAUX DE COMPACTAGE

Des mesures dans un moule de 80 cm de hauteur aboutissent à extraire la densité de la résistance de pointe q_d du limon A1 compacté saturé (figure 6) :

$$q_d = \exp(1,184.\gamma_d - 21,03)$$

Avec $q_d = 0,18, 0,7$ et $1,8$ Mpa pour 90, 95 et 100 % OPN, il n'est donc pas étonnant que le limon de fondation, souvent saturé par la nappe et peu compacté, ait des résistances q_d inférieures à 1 Mpa ($m = 1,2$ Mpa $s = 0,68$ Mpa).

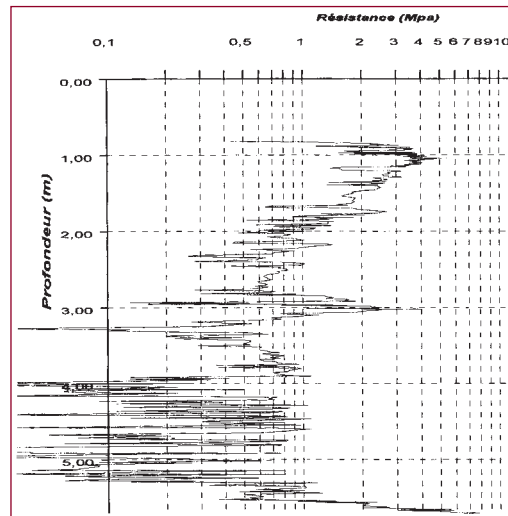
En revanche, les fortes résistances q_d du remblai ($m = 7,3$ Mpa, $s = 2,6$ Mpa) ne sont pas à imputer au compactage, mais à la cohésion capillaire. La résistance est multipliée par 30, lorsque la teneur en eau passe de l'optimum proctor à l'optimum moins 10 % (figures 6 et 7).

CORRÉLATION : RÉSISTANCES PANDA ET SPT

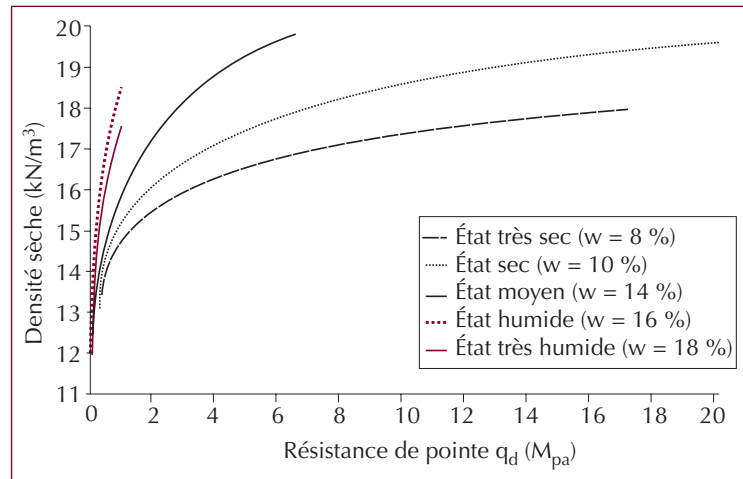
La corrélation avec les SPT est très faible, tant la variabilité à l'échelle métrique est grande. La corrélation sur les moyennes donne :

$$q_d/Pa \approx 2.N$$

Dans cette formule, N est le nombre de coups SPT pour 30 cm d'enfoncement, Pa est un terme correctif fonction de l'unité employée pour q_d .

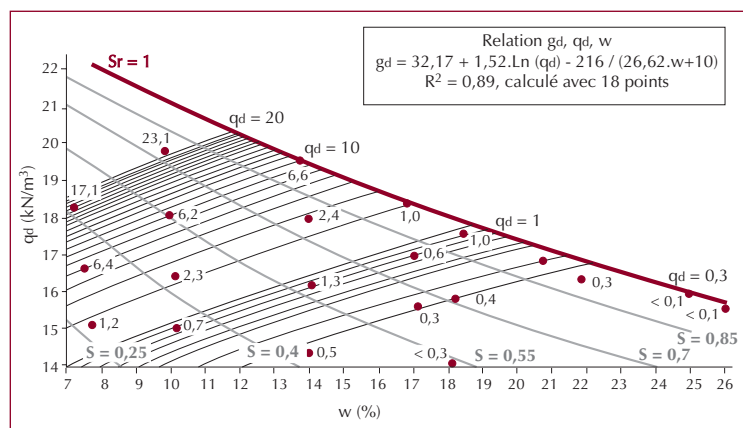


◀ Figure 5 – Pénétragramme du PK 255,683.



▲ Figure 6 – Résistance de pointe en laboratoire fonction du taux de compactage.

▼ Figure 7 – Résistance Panda en laboratoire dans le diagramme Proctor.



L'application de la méthode d'évaluation de la liquéfaction par pénétromètre

L'application de la méthode de Robertson et Wride (1998) basée uniquement sur les essais *in situ* n'est pas suffisante pour évaluer la sécurité vis-à-vis de la liquéfaction des digues du Rhône. En effet les alluvions fines souvent argileuses sortent des corrélations acquises et nécessitent la réalisation d'essais de laboratoire.

L'approche possible consiste à corrélérer les résistances cycliques aux résistances pénétrométriques et de calculer un coefficient de sécurité à la liquéfaction égal à la résistance à la liquéfaction pour la magnitude du séisme, sur le taux de contrainte engendré par le séisme.

Suivant la nature et l'état du limon, la résistance cyclique varie de 0,15 à 0,62. Cependant, la quantification de cette résistance cyclique n'est pas uniquement liée à la résistance pénétrométrique : elle nécessite la connaissance du type de sol. L'importance de la dispersion montre l'intérêt d'une caractérisation fine du sol par le pénétromètre.

Le développement d'une approche de la liquéfaction avec le Panda

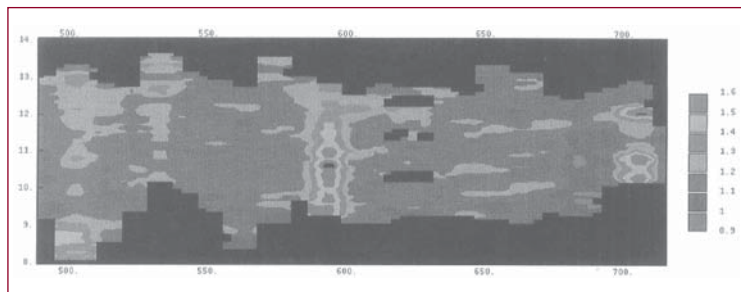
Pour améliorer cette caractérisation avec le Panda, des mesures de perméabilité *in situ* ont été développées et réalisées. Une relation entre le facteur de sol I_c et la perméabilité K et la correction K_c apportée à la résistance cyclique a été établie (Lepetit, 2002) :

$$I_c = -0,301 \cdot \log_{10}(K) + 0,457$$

$$K_c = 0,261 \cdot \log_{10}(K)^2 + 2,16 \cdot \log_{10}(K) + 5,46$$

Ainsi, la limite entre sols argileux et sableux a été fixée à $K = 7,6 \cdot 10^{-8}$ m/s. Cependant les essais triaxiaux montrent que le limon de Vallabrègues peut se liquéfier avec une perméabilité de $2 \cdot 10^{-10}$ m/s, valeur bien en deçà de la limite des sols sableux.

▼ Figure 8 – Coefficient de sécurité à la liquéfaction de la zone B2 par pas de 40 m.



De nouvelles données sur d'autres sites apparaissent nécessaires pour valider la limite de liquéfaction et le facteur de correction K_c des alluvions fines.

L'évaluation de la stabilité post-sismique

À partir de la cartographie des profils d'essais Panda, la variation du coefficient de sécurité à la liquéfaction du limon a pu être établie (figure 8). Les coefficients de sécurité sont légèrement supérieurs à 1. Ils montrent que le limon ne sera pas globalement soumis à un écoulement de liquéfaction après séisme, mais qu'il peut être sujet à des déformations cycliques engendrant des déplacements de plusieurs dizaines de cm.

La sensibilité à la liquéfaction du limon a été caractérisée par le Panda.

Par contre, celle des sables graveleux nécessite un autre programme de reconnaissances pour évaluer la densité relative en place, et les résistances cycliques et résiduelle de ces graves.

L'ensemble des deux études permettra de statuer sur les résultats de la stabilité.

Conclusion

Les essais au Panda apportent une radioscopie fine de la fondation en limon de la digue de Vallabrègues. Ils permettent de localiser des zones les plus critiques par rapport aux zones courantes à partir d'un maillage à définir entre 10 et 100 m, 40 m semble un pas correct pour Vallabrègues. Ils peuvent quantifier la stabilité sismique, dans la mesure où l'interprétation de ces mesures leur associe :

- la connaissance de la position de la nappe ;
- la nature granulométrique et argileuse du limon ;
- les essais de liquéfaction en laboratoire.

Il est rappelé que seules les sections saturées sont à prendre en compte dans l'analyse. Pour un matériau donné, le risque global ou local de la liquéfaction est alors corrélé à la résistance de pointe.

D'une manière plus générale, il s'avère de plus en plus nécessaire en cours d'études statique ou sismique de digue, de disposer d'une méthode *in situ* rapide et économique pour estimer des coefficients de sécurité, en vraie grandeur, tout en restant représentatif d'un grand linéaire.

Les conditions d'interventions du Panda (deux personnes et accès pour véhicule léger) permettent d'intervenir sur de nombreuses typologies de digues en matériaux meubles non graveleux.

Couplés à d'autres techniques, les résultats du Panda, peuvent donc, affiner ou lever des points de réserves sur une étude, très rapidement. □

Résumé

Lors de l'étude de diagnostic sismique réalisé par EDF-CIH sur l'aménagement de Vallabrègues, géré par la Compagnie nationale du Rhône, il est apparu nécessaire de connaître « en vraie grandeur » la représentativité des zones faibles détectées ponctuellement par le pénétromètre SPT.

Après étude, le pénétromètre léger Panda a été retenu. Sol Solution l'a mis en œuvre sur plusieurs sites de l'aménagement étudié.

Son interprétation, grâce à sa résolution fine, dans un matériau bien identifié, permet d'avoir des caractéristiques tout à fait représentatives des sols rencontrés.

En particulier, il a identifié dans le corps de la digue des alternances de couches résistantes et faibles, qui ont pu être modélisées dans le modèle mathématique du CIH. Les résultats du modèle ont pu ainsi être affinés, et l'échelle d'incertitude diminuée.

Abstract

In the frame of the seismic diagnosis survey carried out by EDF-CIH on the Vallabregues scheme operated by the Compagnie Nationale du Rhône, it appeared necessary to know "in real size" the representativeness of weak areas punctually detected by the SPT.

As a result, the Panda method was chosen. Sol Solution has implemented the system on several sites of the studied scheme.

Its interpretation, thanks to its fine resolution, in a well adapted material, allows to obtain representative characteristics of the studied soils.

In particularly, the system has identified in the composition of the embankment, some cycles of resistant and weak layers, which have been designed in the CIH mathematical model. So the results of the model have been improved and the scale of uncertainty decreased.

Bibliographie

FRY, J.-J., DELAGE, P., 1993, The assessment of the stability of earth dams during construction International Workshop on Dam Safety Evaluation, p. 121-136.

ROBERTSON, P.K., WRIDE, C.E., 1998, Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical engineering*, N° 35, p. 442-459.

DELPLAGNE, F., 1994, Simulation de la cohésion pour une digue en argile, 12^e Rencontres universitaires de génie civil, Toulouse.

LEPETIT, L., 2002, *Étude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risque de liquéfaction*, Thèse Université Blaise Pascal Clermont II.

Photo : Service Navigation Rhône-Saône

